

# **МОДЕЛИ ВОЕННЫХ, БОЕВЫХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ДЕЙСТВИЙ**

Под редакцией  
академика РАН *Д. А. Новикова*

МОСКВА  
URSS  
2025

**Авторский коллектив:**

Авербух Ю. В., Афонин И. Е., Васин А. А., Галяев А. А.,  
Дащенко А. Ю., Косарев А. Е., Макаренко С. И., Новиков Д. А.,  
Ромашев Ю. С., Сидоренко А. А., Цыганов Н. И., Чернов И. В.,  
Шумов В. В., Якушенко Е. И.

**Модели военных, боевых и специальных действий** / под ред.  
Д. А. Новикова. – М.: ЛЕНАНД, 2025. – 528 с.

ISBN 978–5–00237–137–2

В монографии с позиций системного и деятельностного подходов изложены теоретические основы военной кибернетики, описаны математические модели военных и боевых (общевойсковых, морских и воздушных) действий, а также специальных действий и охраны государственной границы.

Монография предназначена для специалистов в области обороноспособности, обеспечения национальной, государственной и пограничной безопасности, профессорско-преподавательского состава, научных работников, адъюнктов и аспирантов, слушателей и курсантов военных и пограничных вузов России, стран СНГ и других государств.

*Рекомендовано к изданию редакционным советом  
Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН  
(выписка из протокола № 8 от 02.12.2024 г.)*

# Оглавление

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Введение</b> .....   | <b>8</b>  |
| <b>Глава 1. Введение в военную кибернетику</b> .....  | <b>13</b> |
| 1.1. История моделирования вооруженного противоборства .....  | 13        |
| 1.1.1. Классический этап .....  | 15        |
| 1.1.2. Кибернетический этап .....   | 27        |
| 1.2. Современная кибернетика, теория систем и системный анализ .....  | 35        |
| 1.2.1. Кибернетика и философия управления.....  | 35        |
| 1.2.2. Методология управления .....   | 37        |
| 1.2.3. Теория систем и системный анализ .....   | 38        |
| 1.3. Военная кибернетика как научная дисциплина.....  | 43        |
| 1.3.1. Военная кибернетика 2.0 и ее предметная область .....  | 45        |
| 1.3.2. Классификация моделей военных, боевых<br>и специальных действий .....  | 51        |
| 1.3.3. Принятие решений в условиях неопределенности .....   | 56        |
| 1.4. Ограничения на ведение военных действий в праве вооруженных<br>конфликтов (международном гуманитарном праве).....                                    | 59        |
| <b>Глава 2. Модели безопасности и обороноспособности</b> .....  | <b>78</b> |
| 2.1. Обзор моделей безопасности и национальной силы.....  | 78        |
| 2.1.1. Оценки национальной силы.....  | 82        |
| 2.1.2. Институционализм и безопасность .....  | 84        |
| 2.2. Базовая модель безопасности .....  | 90        |
| 2.2.1. Функция безопасности .....   | 91        |
| 2.2.2. Оценка параметров функции суверенности .....   | 93        |
| 2.2.3. Оценка параметров функции сохранения.....  | 98        |
| 2.2.4. Модель миграции населения.....   | 101       |
| 2.3. Приложения модели безопасности .....   | 103       |
| 2.3.1. Модели геополитической инверсии .....  | 103       |
| 2.3.2. Модели процессов интеграции и дезинтеграции<br>(на примере Европейского Союза).....  | 104       |
| 2.3.3. Социальные издержки в войнах и военных конфликтах .....  | 108       |
| 2.4. Методы и технологии сценарного подхода.....  | 110       |
| 2.4.1. Сценарное моделирование процессов управления.....  | 118       |
| 2.4.2. Пример применения сценарного моделирования для анализа<br>влияния глобальных процессов внешней среды на факторы<br>национальной безопасности ..... | 128       |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Глава 3. Базовые функции в моделях боевых и специальных действий.....</b>            | <b>142</b> |
| 3.1. Агрегированные функции производства и конфликта .....                              | 142        |
| 3.1.1. Производственные функции .....   | 143        |
| 3.1.2. Функции конфликта (успеха в состязании).....                                     | 144        |
| 3.1.3. Функция распределения потерь в конфликтах .....                                  | 148        |
| 3.2. Функция победы в бою, сражении, операции.....                                      | 149        |
| 3.2.1. Закон поражения целей А. Н. Колмогорова .....                                    | 149        |
| 3.2.2. Функция победы в бою, сражении, операции .....                                   | 151        |
| 3.2.3. Оценка параметра масштаба .....  | 155        |
| 3.2.4. Функция победы и современные операции.....                                       | 159        |
| 3.2.5. Функция победы в специальных действиях .....                                     | 161        |
| 3.3. Агрегированные функции в задачах охраны границы.....                               | 165        |
| 3.3.1. Функция задержания нарушителей.....  | 165        |
| 3.3.2. Функция пограничного контроля .....  | 167        |
| 3.4. Функции социально-информационного влияния .....                                    | 169        |
| 3.4.1. Модели ожидаемой полезности.....   | 169        |
| 3.4.2. Функции социально-информационного влияния .....                                  | 173        |
| <b>Глава 4. Модели общевойсковых действий.....</b>                                      | <b>186</b> |
| 4.1. Теоретико-вероятностные модели боевых действий .....                               | 186        |
| 4.1.1. Показатели эффективности стрельбы по одиночным, групповым и площадным целям..... | 189        |
| 4.1.2. Описание боевых действий с помощью цепей Маркова .....                           | 192        |
| 4.1.3. Метод динамики средних .....   | 196        |
| 4.2. Модели динамики боевых действий типа Осипова-Ланчестера.....                       | 199        |
| 4.2.1. Модель боевых действий Осипова-Ланчестера .....                                  | 199        |
| 4.2.2. Учет морального фактора в модели Осипова-Ланчестера .....                        | 202        |
| 4.2.3. Учет действий разнородных группировок войск .....                                | 207        |
| 4.2.4. Применение уравнений Осипова-Ланчестера в системах моделирования.....            | 209        |
| 4.3. Теоретико-игровые модели боевых действий.....                                      | 212        |
| 4.3.1. Обзор теоретико-игровых моделей боя .....  | 212        |
| 4.3.2. Модель «наступление-оборона». Постановка задачи .....                            | 217        |
| 4.3.3. Модель «наступление-оборона». Решение ближайшей задачи ..                        | 219        |
| 4.3.4. Модель «наступление-оборона». Распределение сил и средств ..                     | 222        |
| 4.3.5. Стратегическая и информационная рефлексия.....                                   | 227        |
| 4.3.6. От замысла к решению на боевые действия .....                                    | 236        |
| 4.4. Имитационные модели боя подразделений (групп).....                                 | 238        |
| 4.4.1. Имитационное моделирование и коллективное поведение.....                         | 238        |

|   |            |
|---|------------|
| 4.4.2. Имитационная модель поражения неподвижного объекта<br>(задача о диффузной бомбе) .....                     | 239        |
| 4.4.3. Имитационная модель боя подразделений.....   | 245        |
| <b>Глава 5. Модели боевых действий на море.....</b>   | <b>254</b> |
| 5.1. Имитационные модели боевых действий.....   | 254        |
| 5.1.1. Методы моделирования боевых действий на море .....   | 254        |
| 5.1.2. Классификация имитационных моделей .....   | 256        |
| 5.1.3. Сущность имитационного моделирования<br>и области его применения.....                                      | 259        |
| 5.1.4. Общая структура имитационной модели<br>и методика ее разработки .....                                      | 260        |
| 5.1.5. Основные концептуальные подходы к разработке имитационных<br>моделей боевых действий на море .....         | 263        |
| 5.1.6. Перспективы развития методов имитационного моделирования   | 267        |
| 5.2. Теоретико-игровые модели боевых действий на море .....   | 269        |
| 5.2.1. Парные стратегические игры.....  | 270        |
| 5.2.2. Матричная антагонистическая игра слежения-отрыва .....   | 272        |
| 5.2.3. Стохастические и дифференциальные игры .....   | 276        |
| 5.3. Модели противодействия торпедному оружию .....   | 278        |
| 5.3.1. Противодействие торпедному оружию .....  | 278        |
| 5.3.2. Задача группового управления .....   | 279        |
| 5.3.3. Пример сценария применения .....   | 283        |
| 5.4. Модели поиска и обнаружения морских подводных объектов .....   | 285        |
| 5.4.1. Вероятностный поиск .....  | 288        |
| 5.4.2. Уклонение подвижных объектов от обнаружения системой<br>наблюдателей (сенсор – маневренное средство) ..... | 289        |
| 5.5. Моделирование поиска морского подводного объекта по следу .....  | 294        |
| 5.5.1. Динамика глубинного и поверхностного следов морского<br>подводного объекта .....                           | 294        |
| 5.5.2. Вероятность обнаружения МПО по глубинному кильватерному<br>следу .....                                     | 295        |
| 5.5.3. Поиск аномалий при выполнении маневров.....  | 299        |
| 5.5.4. Сравнение теоретических результатов с результатами<br>имитационного моделирования.....                     | 301        |
| <b>Глава 6. Модели боевых действий в воздухе.....</b>   | <b>306</b> |
| 6.1. Обзор моделей боевых действий в воздухе .....  | 306        |
| 6.1.1. Классификация и краткий обзор моделей<br>боевых действий в воздухе .....                                   | 310        |

|  |            |
|--|------------|
| 6.1.2. Критерии и методы оценки боевых возможностей формирования авиации и ПВО.....                        | 318        |
| 6.1.3. Сценарно-имитационные подходы и решения по проектированию состава и тактики ВКО и ВВС.....          | 322        |
| 6.2. Теоретико-вероятностные модели боевых действий в воздухе.....   | 327        |
| 6.2.1. Теория поиска и ее применение при моделировании боевых действий.....                                | 333        |
| 6.2.2. Теория массового обслуживания и ее применение при моделировании боевых действий.....                | 338        |
| 6.2.3. Теория надежности и ее применение в задачах обеспечения боевой готовности.....                      | 345        |
| 6.2.4. Агрегированная функция ПВО.....   | 350        |
| 6.3. Оптимальное управление и дифференциальные игры в задачах моделирования боевых действий в воздухе..... | 353        |
| 6.3.1. Оптимальное управление динамическими системами.....   | 354        |
| 6.3.2. Динамическое программирование.....  | 357        |
| 6.3.3. Краткие сведения о динамике самолетов и дифференциальная игра преследования двух игроков.....       | 359        |
| 6.3.4. Постановки задач дифференциальной игры.....   | 363        |
| 6.4. Оптимизационные и теоретико-игровые модели боевых действий в воздухе.....                             | 365        |
| 6.4.1. Задачи выпуклой, линейной и многокритериальной оптимизации.....                                     | 366        |
| 6.4.2. Теоретико-игровые модели боевых действий в воздухе.....   | 376        |
| 6.4.3. Распределение средств ПВО между районами (объектами).....   | 380        |
| <b>Глава 7. Модели специальных действий.....</b>   | <b>384</b> |
| 7.1. Обзор моделей специальных действий.....   | 384        |
| 7.1.1. Классификация моделей специальных действий.....   | 385        |
| 7.1.2. Задачи географического профилирования преступности.....   | 390        |
| 7.1.3. Сетевые игры.....   | 394        |
| 7.1.4. Модели динамики специальных действий.....   | 396        |
| 7.2. Игра «атакующий-защитник» в задачах обеспечения безопасности и борьбы с терроризмом.....              | 398        |
| 7.2.1. Классификация постановок задач в игре «атакующий-защитник».....                                     | 398        |
| 7.2.2. Игра безопасности Штакельберга.....   | 402        |
| 7.2.3. Игры патрулирования на графе.....   | 404        |
| 7.2.4. Теоретико-игровые модели обеспечения транспортной безопасности.....                                 | 406        |
| 7.3. Модели борьбы с морским пиратством и терроризмом.....   | 408        |

|   |            |
|---|------------|
| 7.3.1. Статистический анализ незаконных силовых актов на море .....   | 410        |
| 7.3.2. Аналитическая модель оценки эффективности мер по борьбе с пиратством .....   | 414        |
| 7.3.3. Применение ИНС для анализа мер по борьбе с пиратством .....  | 418        |
| <b>Глава 8. Модели охраны государственной границы .....</b>   | <b>426</b> |
| 8.1. Система пограничных мер и обзор моделей обеспечения пограничной безопасности.....  | 426        |
| 8.1.1. Система пограничных мер и задачи пограничной статистики ....   | 426        |
| 8.1.2. Обзор моделей обеспечения пограничной безопасности .....   | 432        |
| 8.2. Обоснование плотностей сил и средств, необходимых для надежной охраны границы.....   | 441        |
| 8.2.1. Модели пограничного сдерживания .....  | 443        |
| 8.2.2. Обоснование требований к построению охраны границы .....   | 447        |
| 8.2.3. Структуры и функции пограничных подразделений .....  | 450        |
| 8.3. Модели применения пограничных сил и средств .....  | 453        |
| 8.3.1. Модели применения беспилотных летательных аппаратов в охране границы .....   | 453        |
| 8.3.2. Модели применения прожекторных станций в охране границы .  | 459        |
| 8.3.3. Комплексирование моделей охраны границы .....  | 462        |
| <b>Заключение. Гетерогенные модели и их комплексирование.....</b>   | <b>467</b> |
| <b>Приложение 1. Примерная программа и литература по системным и математическим основам моделирования военных, боевых и специальных действий.....</b> | <b>473</b> |
| <b>Приложение 2. Элементы теории игр .....</b>  | <b>478</b> |
| <b>Приложение 3. Перечень сокращений .....</b>  | <b>493</b> |
| <b>Литература.....</b>  | <b>496</b> |

# ВВЕДЕНИЕ

**Основные определения.** Приведем, следуя Военной энциклопедии [89], определения базовых понятий, фигурирующих в названии настоящей книги.

*Военные действия* – 1) противоборство сторон в войне; 2) организованные действия вооруженных сил, воинских формирований в ходе войны при выполнении задач оперативного и стратегического масштабов. Военные действия ведутся на суше, в воздухе, на море в форме операций, сражений, боевых действий, в т. ч. боёв и ударов, и могут быть наступательными и оборонительными.

*Боевые действия* – 1) Составная часть военных действий противоборствующих сторон, организованное применение сил и средств объединений, соединений, частей, подразделений для выполнения поставленных боевых задач. 2) Форма оперативного (боевого) применения объединений, соединений, частей, подразделений в рамках операции в составе объединений более крупного масштаба или между операциями для последовательного решения оперативных, оперативно-тактических, тактических задач.

*Специальные действия* – мероприятия, проводимые специально назначенными, организованными, подготовленными и оснащенными силами, применяющими методы и способы боевых действий, не характерные для обычных сил (разведывательно-диверсионные, подрывные, контртеррористические, контрдиверсионные, контрразведывательные, партизанские, антипартизанские и другие действия).

В таблице В.1 приведены уровни и подуровни рассмотрения проблем обороны и безопасности, а также соответствующая им основная деятельность.

Таблица В.1. Уровни, подуровни и основная деятельность

| Уровни           | Подуровни      | Основная деятельность  |
|------------------|----------------|--|
| Политический     |                | Принятие стратегических решений<br>Институциональное управление  |
| Организационный  | Стратегический | Военные действия   |
|                  | Оперативный    | Боевые действия  |
|                  | Тактический    | Боевые действия<br>Специальные действия  |
| Обеспечивающий   |                | Создание условий<br>(материальных, информационных и др.)<br>деятельности                                   |
| Производственный |                | Проектирование, производство,<br>эксплуатация вооружения и военной<br>техники.<br>Развитие (вкл. обучение) |
| Объектный        |                | Функционирование   |

Предмет настоящей работы выделен в табл. В.1 серым цветом. Основным методом является математическое моделирование<sup>1</sup>.

**Математика в военном деле.** С исторической точки зрения, в 1950-1980-е годы, как в СССР, так и в западных странах, наблюдался небывалый всплеск использования исследования операций – вероятностных (включая марковские), оптимизационных, теоретико-игровых и др. моделей в приложении к военным и боевым действиям.

Перечислим основные классы предметов моделирования (и соответствующий математический аппарат) в порядке условного убывания «популярности» у исследователей (и во второй половине XX века, и в начале XXI; см. обзор и ссылки в первой главе):

1) вероятности обнаружения и поражения/защиты целей (в т.ч. групповых, при многократной стрельбе, с использованием различных видов оружия) (теория вероятностей, теория надежности, методы Монте-Карло);

2) динамика численности сражающихся сторон (дифференциальные уравнения Осипова-Ланчестера и их непрерывные и дискретные модификации, учитывающие ввод резервов, перегруппировку сил и средств, моральный дух сражающихся и др.; марковские модели боя (уравнения Колмогорова); модели противовоздушной или противотанковой обороны в терминах систем массового обслуживания)<sup>2</sup>;

3) распределение сил и средств, целераспределение (математическое программирование; некооперативные (как правило, биматричные или динамические) игры);

4) выбор траекторий, наблюдение/патрулирование, поиск/преследование/уклонение объектов (динамическое программирование, оптимальное управление, дифференциальные игры);

5) транспортно-логистические задачи и задачи размещения (календарно-сетевое планирование и управление, дискретная оптимизация, теория графов);

6) распределение ресурсов, оптимизация состава сил и средств, в т.ч. перспективных (методы оптимизации – задачи о назначении, транспортные задачи, задачи о рюкзаке и т. д.), в т.ч. многокритериальные и с учетом экономических критериев (затраты/эффект) на поддержание и повышение боеготовности и боевой эффективности;

---

<sup>1</sup> Минимальные сведения из области прикладной математики, необходимые читателю для осознанного прочтения материала настоящей книги, структурированы в Приложении 1 ниже.

<sup>2</sup> Модели, перечисленные в пунктах 1 и 2, легли в основу многочисленных компьютерных имитационных моделей.

7) пространственно-временная динамика сил и средств (уравнения в частных производных).

В 1960-80-е годы к этим направлениям добавляются задачи моделирования стратегической стабильности во взаимоотношениях стран и их блоков с использованием аппарата теории игр и принятия решений – см., например, [14; 238; 374] и др.

С 1980-90-х годов появились и развиваются (особенно с ростом вычислительных мощностей) агентные имитационные модели (сначала – использующие клеточные автоматы, затем – автоматы, имеющие все более сложную и богатую внутреннюю структуру [159]).

В 2000-х годах отмечается всплеск работ в области моделирования безопасности и охраны границ (см. обзор работ по исследованию операций в [473]).

**Структура изложения.** Настоящая монография охватывает «классические» задачи моделирования, соответствующие пп. 1-4 приведенного выше списка и содержит восемь крупных глав.

Первая глава является введением в военную кибернетику и описывает системный и деятельностный подход к организации и управлению военной деятельностью и ее математическому моделированию.

Вторая глава включает в себя модели безопасности и обороноспособности.

Третья глава описывает общие для всех моделей боевых и специальных действий базовые функции (производства, конфликта, победы и др.).

Следующие три главы соответствуют трем базовым средам ведения военных и специальных действий – суше (глава 4), морю (глава 5) и воздуху (глава 6).

Седьмая глава посвящена моделям специальных действий.

Восьмая – моделям охраны государственной границы.

В интересах большей доступности материала иногда допускаются повторения.

**Что не вошло в книгу.** Завершая введение, авторы должны признаться, какие крупные смежные темы остались не охваченными настоящей книгой. Во-первых, это задачи, перечисленные в пп. 5-7 выше. Во-вторых, с точки зрения сред, в которых могут вестись боевые или специальные действия, совсем не затронуты космос и киберпространство. В-третьих, с точки зрения

автоматизации – роботы поля боя. В-четвертых – политический, обеспечивающий<sup>1</sup> и предметный уровни табл. В.1.

**Вклад авторов.** Работа авторского коллектива над монографией распределилась следующим образом:

Авербух Юрий Владимирович, Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского Уральского отделения РАН, д-р матем. н., вед. научн. сотр., раздел 6.3 (совместно с Галяевым А. А.);

Афонин Илья Евгеньевич, Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков, канд. техн. н., доц., раздел 6.1 (совместно с Макаренко С. И.);

Васин Александр Алексеевич, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, д-р физ.-мат. н., проф., раздел 3.1 (совместно с Цыгановым Н. И.);

Галяев Андрей Алексеевич, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, член-корреспондент РАН, д-р техн. н., проф., разделы 5.4, 5.5, разделы 5.1-5.3 (совместно с Якушенко Е. И.), раздел 6.3 (совместно с Авербухом Ю. В.);

Дащенко Александр Юрьевич, отделение погранологии, д-р воен. н., доц., раздел 8.1 (совместно с Косаревым А. Е.);

Косарев Алексей Евгеньевич, отделение погранологии, канд. техн. н., доц., раздел 8.1 (совместно с Дащенко А. Ю.);

Макаренко Сергей Иванович, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), д-р техн. н., доц., раздел 6.1 (совместно с Афоным И. Е.);

Новиков Дмитрий Александрович, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, академик РАН, д-р техн. н., проф., общая редакция, введение, заключение, глава 1 (без 1.4), разделы 4.1, 4.3, 4.4 (совместно с Шумовым В. В.), приложения 1 и 2;

Ромашев Юрий Сергеевич, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», д-р юрид. н., проф., раздел 1.4;

Сидоренко Александр Анатольевич, отделение погранологии, д-р техн. н., доц., раздел 7.3 (совместно с Шумовым В. В.);

Цыганов Никита Игоревич, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, раздел 3.1 (совместно с Васиным А. А.);

---

<sup>1</sup> Связь, виды боевого, морально-психологического, медицинского и материально-технического обеспечения (включая разведку, охранение, радиоэлектронную борьбу, маскировку, инженерное обеспечение, радиационную, химическую и биологическую защиту, топогеодезическое и навигационное, гидрометеорологическое обеспечение и др.).

Чернов Игорь Викторович, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, канд. техн. н., раздел 2.4;

Шумов Владислав Вячеславович, Институт проблем управления им В. А. Трапезникова РАН, д-р техн. н., проф., разделы 4.1, 4.3, 4.4 (совместно с Новиковым Д.А.), 7.3 (совместно с Сидоренко А. А.), 2.1-2.3, 3.2-3.4, 4.2, 6.2, 6.4, 7.1, 7.2, 8.2, 8.3;

Якушенко Евгений Иванович, Санкт-Петербургское отделение РАН, академик РАН, д-р техн. н., проф., разделы 5.1-5.3 (совместно с Галяевым А. А.).

# ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ В ВОЕННУЮ КИБЕРНЕТИКУ

Настоящая глава посвящена описанию истории моделирования вооруженного противоборства, анализу современной кибернетики, рассмотрению предметной области и структуры военной кибернетики, классификации методов и моделей военных, боевых и специальных действий, защиты и охраны государственной границы. Заключительным является раздел по международному праву вооруженных конфликтов, которое формулирует нормы деятельности и подлежит учету в моделях в качестве ограничений.

## 1.1. История моделирования вооруженного противоборства

*Модель* (model) – образ некоторой системы; аналог (схема, структура, знаковая система) определенного фрагмента природной или социальной реальности, «заместитель» оригинала в познании и практике [337].

*Моделирование* (modeling, simulation) – метод исследования объектов познания на их моделях, построение моделей реально существующих предметов и явлений [337].

*Моделирование боевых действий* – один из разделов военной науки и практики; на состояние моделирования оказывают влияние в первую очередь развитие: а) науки в целом (прежде всего, естествознания), б) военных технологий.

Основным предметом *военной науки* является *вооруженная борьба*<sup>1</sup>.

В силу столь обширного объекта исследований военная наука является синтетической и включает в свой состав социально-гуманитарные, естественнонаучные и технические знания. Синтез этих знаний, получение на его основе новых и значимых научных результатов обычно сопровождается сменой (расширением) исследовательской парадигмы. В философии науки этот процесс обычно связан с осмыслением возникающих в ходе развития науки новых типов ее рациональности [325].

---

<sup>1</sup> Военная наука. – URL: <https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=4339@morfDictionary> (дата обращения – 1.09.2024).

Рассмотрим факторы, оказывающие существенное значение на развитие военной науки.

Получение новых знаний в военной науке и их реализация на практике происходит в форме организационной работы и, шире, *организационной культуры* (организационная работа имеет своим критерием не истину, но реализацию замысла; организационный замысел находит свое воплощение в создании организационной формы [245]). По В.А. Никитину, с невидимыми формами, лежащими в основе организационного представления общества и культуры, можно работать технически и за счет этого совершать преобразования самого общества и культуры. В этом, с точки зрения В.А. Никитина, состоит вклад К. Маркса в организационный подход, в последующем развитый В.И. Лениным (программа партии, план ГОЭЛРО, организация научных исследований и др.) и проявившийся, в частности, в блестящих результатах советской науки (математика, физика, кибернетика, военная наука и т. д.)<sup>1</sup>.

Дуализм основных закономерностей развития военной науки (с одной стороны, обусловленность развития науки потребностями общественно-исторической практики, а с другой – относительная самостоятельность развития науки и наличие в ней механизмов разрешения противоречий и продвижения результатов даже вопреки установкам тех или иных руководителей, действующих нормативов и документов) предполагает одновременное задействование всех типов организационной культуры (их характеристику можно найти в работе [247, с. 35-40]).

В 1955 г. английский историк М. Робертс ввел в научный оборот термин «военная революция». Созданная им концепция военной революции утверждает, что на протяжении последних трех тысячелетий в мире произошло несколько военных революций, каждая из которых была началом нового этапа истории. Как полагает М. Робертс, военная революция 1560-1660 гг. изменила весь ход истории Европы. Появление регулярной армии потребовало создания эффективной налоговой системы и сильного централизованного государства [545]. Таким образом, развитие военной науки и практики происходит в форме эволюционных и революционных изменений. Революции в науке – это смена *парадигм, научные революции* [199], революции военной практики, разделяющие периоды эволюционного развития, описываются концепцией военных революций.

---

<sup>1</sup> Отдельного исследования заслуживает проблема организации военного научного знания, ее исторические и современные аспекты.

Концепция военной революции М. Робертса была развита другими историками. По мнению одних исследователей новшества в военном деле (широкое применение огнестрельного оружия, новые системы фортификации, рост численности армий) повлекли за собой изменения в политическом, социальном, экономическом и культурном устройстве западноевропейского общества; с точки зрения других – все было с точностью до наоборот [282]. Дискуссии вокруг проблемы военных революций привлекли внимание специалистов многих наук (один из сторонников концепции военных революций – российский политолог С. А. Караганов [163]).

Учитывая вышеизложенные положения концептуального характера (саморазвивающиеся военные системы и организационная культура, развитие военной науки и практики в форме эволюций и революций), далее рассмотрим основные этапы моделирования вооруженной борьбы как раздела военной науки и учения о национальной безопасности. Авторы не ставят целью указать их временные рамки, поскольку работы, систематизирующие результаты исследований внутри одного этапа, могут появляться гораздо позже, когда парадигма текущих исследований уже изменилась.

### *1.1.1. Классический этап*

С исторической точки зрения одним из первых приложений «исследования операций»<sup>1</sup> к военному делу считается деятельность Архимеда (287–212 до н.э.) при организации обороны Сиракуз.

В древнекитайском трактате «Искусство войны» [329], написанном не позднее III века до н.э. и посвященном тактике, военной стратегии и политике, автор в основу оценки соотношения сил сторон и прогноза исхода войны положил пять явлений и семь расчетов.

Явления (факторы) по Сунь Цзы:

- Путь (единодушие народа и правителя);
- Небо (соответствие времени);
- Земля (соответствие месту);
- Полководец (ум, беспристрастность, гуманность, мужество, строгость);
- Закон (воинский строй, командование и снабжение).

---

<sup>1</sup> Исследование операций как область приложений математики для анализа и планирования военных операций начала формироваться в годы Второй мировой войны. В последующем предметная область исследования операций расширилась и ныне ее предметом являются количественные методы для оценки эффективности и оптимизации организационной и управленческой деятельности.

Расчеты таковы: «Кто из государей обладает Путем? У кого из полководцев есть таланты? Кто использовал Небо и Землю? У кого выполняются правила и приказы? У кого войско сильнее? У кого офицеры и солдаты лучше обучены? У кого правильно награждают и наказывают?» [329, с. 38].

Искусству войны также посвящен древнекитайский трактат «Тридцать шесть стратагем» [343]. Понятие «*стратагема*» означает: стратегия, тактика, военная хитрость; уловка; затея. В более широком смысле, это система тактических ходов, используемая для достижения скрытой цели<sup>1</sup>.

Византийская империя, просуществовавшая почти тысячу лет после падения Западной Римской империи в 476 году, находилась в сложных условиях (противостояние Персии, арабам, туркам, кочевникам Великой Евразийской степи). Военная сила у византийцев была подчинена дипломатии и использовалась в основном для сдерживания и наказания, а не для нападения и защиты. Их стратегия заключалась в том, чтобы саму многочисленность врагов превратить в преимущество, заставить их воевать друг с другом, а не с империей [207].

Два полководца Нового времени, Суворов и Наполеон, внесшие выдающийся вклад в военную науку и практику, придавали огромное значение образованию и знаниям/наукам.

В 1763 г. А. В. Суворов, приняв командование Суздальским пехотным полком, выстроил здание для школы и открыл две школы – для дворянских и солдатских детей, разделил на классы и сам сделался в них преподавателем. Он учил начальным правилам арифметики и написал учебник. Быть может, он учил и Закону Божию, так как составил молитвенник и краткий катехизис [144]. Генералу необходимо, говорил Суворов, непрерывное образование себя науками с помощью чтения. Ему нужно мужество, офицеру – храбрость, солдату – бодрость.

Вот главный принцип планирования А.В. Суворова: «План операционный в главную армию, в корпус, в колонну. Ясное распределение полков. Везде расчет времени... Вместе с планом должен быть приложен небольшой чертеж, на котором нет нужды назначать множество деревушек, а только главные и ближайšie места, в той мере, сколько может быть нужно для простого воина; притом нужно дать некоторого рода понятия о возвышениях (горах)» [157, с. 451].

Обладая проницательным умом, А. В. Суворов поставил Наполеона после первого его похода 1796-1797 гг. в один ряд с Ганнибалом и Ю. Цезарем [236, с. 347-348].

---

<sup>1</sup> В книге «Рефлексия и управление» на примере ряда стратагем рассмотрены задачи скрытого и институционального управления [260].

Составляя в 1798 г. план по экспедиции для завоевания Египта, Наполеон образует при армии научную комиссию в составе астрономов, математиков, натуралистов, минеролога, археолога и химика. За заслуги в математике Наполеон избран академиком Французской академии. Среди его научных заслуг отмечают, в частности, следующее:

– предложен простой способ построения квадрата одной линейкой с двумя засечками;

– поставлена и решена задача про равнобедренные треугольники, носящая его имя.

Об уровне развития военной науки к началу XX в. можно судить по энциклопедическому словарю Брокгауза и Ефрона. В нем военная наука определялась как теория войны, учение о войне, систематическое развитие законов военного искусства. В военной науке выделялись: а) военная политика (учение о военных целях); б) организация, управление, вооружение и снаряжение войск и сил (учение о военных средствах); в) стратегия и тактика (учение о применении воинских средств для достижения поставленной цели); г) вспомогательные науки (военная география, военная химия, военная топография и т. д.) [90, с. 119-120].

С XIX в. в практику штабов и учебных заведений внедряются *военные игры* – упражнения на картах и планах. Играющие делятся на две партии, сношения между которыми происходит через посредника. Для игры берется обстановка из какого-либо военного эпизода, что и составляет первоначальное задание. Обе стороны согласно с заданием располагают свои войска на планах или картах особыми «шашками» и делают распоряжения для действий. Сообразно с этими распоряжениями посредник передвигает войска через известные промежутки времени, называемые *ходами*. В зависимости от условий, при которых это столкновение происходит, посредник решает, кому отступить, для чего иногда прибегает к *игральной кости*. Решения посредника принимаются играющими без возражений [90, с. 118].

В конце XIX в. вышла шеститомная фундаментальная работа под редакцией И. С. Блюха «Будущая война в техническом, экономическом и политическом отношениях» [51]. К написанию книги были привлечены ведущие российские и европейские специалисты (экономисты, статистики, инженеры, военные). Книга вышла в 1898 году на русском и немецком языках, позже была опубликована на английском, французском и польском языках. В работе на основе анализа перспектив развития техники и точных расчетов предсказано, что: а) новая военная техника приведет к снижению важности штыковых и кавалерийских атак; б) как следствие, война будет позиционной, с большим преимуществом обороняющихся перед наступающими; в) возникнут позиционные фронты, армии станут многомиллионными; г) война затянется на годы,

станет войной на истощение, вырастет вероятность возникновения голода, эпидемий и революций.

Упомянутая книга явилась блестящим примером системного подхода к исследованию сложных социальных, политических, экономических и военных явлений и процессов<sup>1</sup>.

Ключевой вехой, точкой отсчета работ в области математического моделирования динамики вооруженной борьбы являются модели Михаила Павловича Осипова [274] и Фредерика Ланчестера [508].

Интерес к творческому наследию М. П. Осипова был возрожден благодаря публикациям Р. М. Юсупова и В. П. Иванова (СПб ФИЦ РАН) [398; 399], Р. Л. Гельмбольда и А. С. Рема [474], Н. В. Митюкова [234], В. В. Шумова [389], А. Л. Фрадкова [458] и др.

Кратко отметим вклад М. П. Осипова в теорию моделирования боевых действий<sup>2</sup>.

1. Разработаны принципы моделирования боевых действий:

– неразрывная связь военной статистики, военного искусства и математического моделирования («военная история может дать исходные числа, а объяснение их относится к области математики»);

– более предпочтительны *аналитические модели*, основанные на тактических принципах и физических законах, чем статистические, основанные на «подгонке» результатов под ограниченный набор статистических данных. Аналитические модели в сравнении с эмпирическими более понятны и допускают расширения для учета новых факторов (ввод в бой резервов, операционные потери, возможности боевого обеспечения, искусство полководца, моральный фактор и др.);

– свидетельством «правильности» моделей является соответствие результатов моделирования принципам военного искусства («правило – бить врага по частям служит несомненным подтверждением основного положения нашей теории, что потери сильнейшего числом должны быть меньше, чем у слабейшего»);

– практическое предназначение моделей боя («теория потерь не отвергает никаких воинских уставов или правил, а наоборот, требует исполнения их, напоминая, что всякое упущение в этом отношении изменяет среднее, законное соотношение потерь в другое, клонящее в пользу противника, т. е. влечет за собою излишние потери, которых можно было бы избежать. Единст-

<sup>1</sup> В науке и междисциплинарных исследованиях термины «системный подход» и «системный анализ» стали широко применяться с 1950-х гг.

<sup>2</sup> Цитаты даны по работе М.П. Осипова «Влияние численности сражающихся сторон на их потери».

венная практическая цель теории потерь – это более сознательное управление численностью войск для уменьшения своих потерь и для увеличения потерь противника»).

2. Заложены основы *теории боевых потенциалов* (оценки соотношения сил сторон):

- обосновано требование разделения списочного состава частей и соединений на боевой («активный») и обеспечивающий;

- оценен боевой потенциал активных боевых единиц, имеющих на вооружении винтовки (ружья), пулеметы и орудия (орудийный расчет эквивалентен 50–150 бойцам с ружьями);

- для оценки вклада различного оружия рекомендовано учитывать его количество и потери пехоты в результате применения этого оружия;

- показано, что вклад различных боевых единиц в исход боя не линейен;

- при расчете боевых потенциалов необходимо учитывать степень инженерного и других видов обеспечения.

3. Определены основные факторы, подлежащие учету в моделях боя:

- искусство полководца (заключается «в умении выставить на поле битвы и ввести в бой наибольшее число активных бойцов, поддержать их моральное настроение, в удачном маневрировании и вообще в умении пользоваться всякою случайностью»). На примере Аустерлицкого сражения показано, что вклад полководца (Наполеона) в победу эквивалентен увеличению боевой численности его стороны на 25–30%;

- моральное настроение войск. Моральный упадок войск заключается в увеличении доли бойцов, уклоняющихся от ведения боя. По М. П. Осипову, «победа зависит не от продолжительности боя, а главным образом от понесенных сторонами потерь; поэтому вернее будет считать, что бой длится до тех пор, пока потери одной из сторон не достигнут некоторого определенного %. Таким % в среднем можно считать 20%...»);

- качество («достоинство») оружия, воспитание, организация и обучение войска;

- местность, укрепления и образ действий.

Советская военная наука унаследовала лучшие традиции отечественной дореволюционной науки, а внедрявшийся повсеместно проектный стиль управления и деятельности создавал дополнительные побудительные мотивы к ее развитию (общепризнанно, что оперативное искусство как самостоятельный раздел военного искусства разработано в СССР). В советской военной науке довоенного времени условно можно выделить два подхода: первый – историко-повествовательный (Б. М. Шапошников, А. А. Свечин и др.), второй – научно-проектный (В. К. Триандафиллов, О. М. Белицкий и др.). Сочетание этих подходов привело к возникновению новой парадигмы в военной науке:

во-первых, выделено в самостоятельную отрасль военной науки оперативное искусство, во-вторых, разработана теория глубоких операций как инструмент достижения оперативных задач, а последовательное проведение таких операций – стратегических). Концепция глубоких операций стала частью Временного Полевого устава РККА 1936 г. [96].

В предисловии к первому изданию «Характера операций современных армий» [342] автор так характеризует свою работу: сначала рассматривается материальная база этих операций – вооружение современных армий, их численность, организация и другие важнейшие данные обстановки, влияющие на характер боевых действий, и вслед за этим на основании всех этих данных исследуются узловые вопросы современной тактики, отдельной операции и ряда последовательных операций. По мнению В. К. Триандафиллова только выражение на языке конкретных цифр, тактических и оперативных норм является единственным путем, чтобы показать различие между настоящим и прошлым, выявить тенденции развития военного дела. Иными словами, В. К. Триандафилловым разработан инструмент (методология) исследования военных проблем и их решения на оперативном уровне.

Дадим краткую характеристику методологии Владимира Кириаковича Триандафиллова в виде последовательности этапов исследования:

1-й этап – анализ состояния современных армий:

– анализ характеристик и возможностей современных и перспективных образцов стрелкового оружия, артиллерии, танков, авиации, средств радиационной, химической и биологической защиты, инженерных средств, средств связи и управления; выводы по их влиянию на устойчивость обороны и темпы наступления;

– анализ армий мирного времени и мобилизационных возможностей государств, последовательности мобилизации, развертывания и обучения новых соединений и частей, оснащения их вооружением и боевой техникой;

– оценка типовых организационных структур соединений и объединений, соотношений между родами войск и их транспортных средств, выявление соотношения между их оборонительными и наступательными средствами.

2-й этап – анализ операций современных армий:

– оценка плотности оперативного развертывания войск на различных театрах военных действий (ТВД);

– оценка оборонительных и наступательных возможностей дивизии и корпуса; обоснование полос обороны по фронту и в глубину (на главном и второстепенных направлениях) и потребных средств усиления, при которых обеспечивается устойчивая оборона; расчет потребных сил и средств для прорыва обороны (примеры частных расчетов представлены в табл. 1.1.1 и 1.1.2 [342]);

– анализ армейской операции (подход к полю сражения, построение походного порядка с учетом транспортной доступности; выбор направления главного и второстепенного ударов, оперативное построение войск, порядок разгрома противника), оценка длительности и глубины операции с учетом современных средств ведения боя, особенности ведения оборонительной операции, оценка потерь;

– анализ последовательных операций (условия перемещения войск, темп продвижения наступающих армий, потребности армий в продовольственном и материально-техническом обеспечении, темп восстановления железных и автомобильных дорог, мостов и колонных путей, размах последовательных операций, характер действий ударных группировок, задачи по видам обеспечения, вопросы управления).

Таблица 1.1.1. Потребность в снарядах при наступлении против обороны, занимающей от 4 до 8 км одной пехотной дивизией

| Задачи  | Цели                                   | Число снарядов на каждую цель | Общее число снарядов |
|---|--|-------------------------------|----------------------|
| Подавление огня пехоты противника   | Около 12 гнезд станковых пулеметов; 24 | 100                           | 1200                 |
|   | легк. пулем. звеньев; 24               | 75                            | 1800                 |
|   | стрелк. звеньев                        | 50                            | 1200                 |
| Разрушение искусственных препятствий, считая по одному проходу на взвод 1-й линии, шириной в 12 м каждый, считая по 50 гранат на 2 пог. м | 16 проходов                            | 300                           | 4800                 |
| Поддержание огня против подавленных неприятельских батарей (считая, что на фронте дивизии могут работать 2-3 батареи противника)          | –                                      | 1-2 батареи                   |                      |
| Итого снарядов  |  |                               | 9000                 |

Таблица 1.1.2. Возможности штатной артиллерии дивизии по обеспечению прорыва обороны противника

| Характер наступления и обороны  | Обеспечивается артиллерией атака на фронте в дивизиях, м |                            | Примечание   |
|---|--|----------------------------|--|
|   | западно-европейских армий                                | восточно-европейских армий |  |
| При наступлении на оборону с нормальными или широкими дивизионными участками (8-12 км на пех. див.) | 800 – 1100   | 500 – 800                  | Контрбатарейные задачи возложены на корпусную артиллерию |
| При наступлении на растянутую оборону (20 км на пех. див.) и в условиях встречного боя              | 2500   | 1500 – 2000                |  |

В разделе «Вопросы управления» В. К. Триандафиллов отметил, что «вся настоящая работа направлена к тому, чтобы установить те отправные данные, которые должны правильно ориентировать оперативную мысль при определении потребных для данной операции материальных и людских средств». И далее: «Оперативное решение заключается не только в том, чтобы правильно выбрать направление и форму удара, но и в том, чтобы правильно организовать тот инструмент, те армейские соединения, при помощи которых полководец будет добиваться решения задачи. Нужно определить количество различных родов войск (в особенности артиллерии, танков, авиации), которые должны быть включены в состав армии, распределить их между стрелковыми корпусами таким образом, чтобы обеспечить как безотказность в действии первого удара, так и непрерывное усиление войск на тех направлениях, на которых в ходе боевых действий это окажется необходимым» [342, с. 224-225].

Анализ труда В. К. Триандафиллова «Характер операций современных армий» позволяет сделать вывод о вкладе автора не только в военную науку, но и в «Системный анализ» и «Исследование операций» (*operations research* или в последующем *management science*). Так, *исследование операций* определяется как «научный метод, дающий в распоряжение военного командования или другого исполнительного органа количественные основания для принятия решений по действию войск или других организаций, находящихся под его управлением» [239, с. 21].

О высоком уровне развития предвоенной советской военной науки также можно судить по работе Георгия Самойловича Иссерсона «Новые формы борьбы», в которой на основе анализа войны в Испании и германо-польской войны, в частности, сделан следующий вывод: «Война вообще не объявляется. Она просто начинается заранее развернутыми вооруженными силами. Мобилизация и сосредоточение относятся не к периоду после наступления состояния войны, как это было в 1914 году, а незаметно, постепенно проводятся задолго до этого. Разумеется, полностью скрыть это невозможно. В тех или иных размерах о сосредоточении становится известным. Однако от угрозы войны до вступления в войну всегда остается еще шаг. Он порождает сомнение, подготавливается ли действительное военное выступление или это только угроза. И пока одна сторона остается в этом сомнении, другая, твердо решившаяся на выступление, продолжает сосредоточение, пока, – наконец, на границе не оказывается развернутой огромная вооруженная сила. После этого остается только дать сигнал, и война сразу разражается в своем полном масштабе» [156].

Накануне Великой Отечественной войны в РККА были проведены военные игры [153]. Г. К. Жуков в своем докладе «Характер современной наступательной операции» на совещании высшего руководящего состава РККА 23-31 декабря 1940 г. фактически повторил главные тезисы теории глубоких операций В. К. Триандафиллова [313]. Г. К. Жуков умело применил положения теории глубоких операций в сражении на реке Халхин-Гол, в ходе оперативно-стратегической военной игры в январе 1941 г., командуя войсками «западных», разгромил войска «восточных» (командующий – Д. Г. Павлов). С точки зрения получения высшим командным составом практики руководства войсками в операциях, игры<sup>1</sup> достигли своей цели [52].

Военно-научная работа в годы Великой Отечественной войны и в послевоенное время была продолжена по двум основным направлениям.

Первое направление – изучение и обобщение опыта войны. В конце 1941 – начале 1942 г. несколько действующих фронтов (в первую очередь Западный фронт Жукова) учредили у себя подчиненные начальникам штабов организации, чьи задачи заключались в сборе и анализе боевого опыта с целью извлечения уроков, способных повысить боевую отдачу их войск. 25 апреля 1942 г. ГКО постановил учредить в составе Генштаба отдел по использованию опыта войны (ОПИОВ). В марте 1944 г. отдел был преобразован в Управление по обобщению и использованию опыта войны (УПОИОВ). Отдел и его преемник УПОИОВ тесно сотрудничали с Оперативным управлением и часто посещали действующие фронты, начальники штабов которых ведали схожими органами на уровне фронтов и армий. Одновременно шло сотрудничество с Военно-историческим отделом Генерального штаба, который подготовил много собственных подробных исследований, большинство которых вышло в свет уже после окончания войны [110].

Второе направление – привлечение ученых из Академии наук СССР и вузов для решения задач моделирования и оценки эффективности боевых действий (см. [318]).

На военно-научной конференции 1945 г. Г.К. Жуков выделил основные вопросы, влияющие на успех боя, сражения, операции [309].

Первое – это отличное знание противника, правильная оценка его плана действий, точная оценка сил, средств и возможности противника. Знание слабых и сильных сторон противника. Знание, на что противник способен и на что не способен, знание, на чем можно поймать противника.

---

<sup>1</sup> Отдельного описания заслуживает вопрос организации военных игр и оценки действий сторон в ходе игры.

Второй вопрос – это знание своих войск, тщательная и целеустремленная подготовка их к предстоящему бою и операции.

Третий вопрос и крупнейший фактор, влияющий на успешность проведения операции, есть достижение оперативной и тактической внезапности. Внезапность достигается главным образом через два элемента – обман противника и стремительность действий.

Четвертый вопрос – это точный расчет сил и средств для проведения операции. Опыт показал, что нельзя ставить войскам непосильные задачи. Практика постановки непосильных задач, кроме потерь, истощения сил и подрыва воинского духа ничего не дает.

Пятый вопрос – это самый сложный вопрос подготовки операции, это материальное обеспечение и подготовка тыла к обеспечению операции.

Шестой вопрос – об артиллерии.

Эти «основные вопросы» Г.К. Жукова, во-первых, одни и те же для всех масштабов боевых и военных действий (бой, сражение, операция), во-вторых, актуальны и в настоящее время, в-третьих, указывают основные задачи моделирования боевых действий (расчет потребных сил и средств, обоснование замысла и решения командира, командующего).

На Западе в годы второй мировой войны при штабах и командованиях были созданы группы по исследованию операций [239]. В 1948 г. в университете Дж. Хопкинса (США) создан отдел исследования операций. На его базе в 1961 г. была создана исследовательская корпорация Research Analysis Corporation. В США в послевоенное время основной акцент в области исследования операций делался на моделировании военных действий на театре военных действий (ТВД) [424]. О результатах исследований в интересах флота в годы второй мировой войны и их послевоенном обобщении можно судить по оглавлению книги «Методы исследования операций» Ф. М. Морза и Дж. Е. Кимбелла [239]:

*Глава 1. Введение.* Определения и методы исследования операций, требования к подбору исследователей и их взаимодействию с командованием и штабами.

*Глава 2. Вероятность.* Изложение основных положений теории вероятностей и элементов математической статистики.

*Глава 3. Применение критерия эффективности.* Анализ поисковых возможностей, оценка потерь сторон, оценки относительной эффективности и тактико-технических характеристик вооружения.

*Глава 4. Стратегическая кинематика.* Расчет потребных сил, анализ и обобщение уравнений Ланчестера, оценка скорости достижения результатов.

*Глава 5. Анализ тактических операций.* Статистические решения, аналитические решения на основе теории поиска, анализ действий и противодействий, мер и контрмер.

*Глава 6. Задачи, связанные с обстрелом и бомбардировкой.* Стрельба по целям и площадям, стрельба с искусственным рассеиванием, метод выборочных проб.

*Глава 7. Опытные операции с исследованием вопросов вооружения и тактики.* Планирование опытных операций (учений), измерения точности, оценка приборов обнаружения, проблемы «скрытности» цели при действиях артиллерии.

*Глава 8. Вопросы организации работы.*

Обзор работ в области исследования операций в США в 1960-2000 гг. представлен в работе «Исследование военных операций – исторические перспективы и извлеченные уроки» [424].

В 1960-е гг. военные модели были представлены на двух уровнях: а) имитационные модели действий небольших подразделений (рота и батальон), б) частные модели оценки возможностей армейских группировок (расчет показателей огневой мощи сторон как средневзвешенной суммы показателей отдельных боевых единиц, расчет боевого перемещения в зависимости от соотношения сил сторон) и аналитические модели на основе динамики средних. Первоначально модели Осипова-Ланчестера представляли скорее академический интерес и были мало пригодны в военном планировании. В последующем были разработаны гибридные аналитико-имитационные модели, предназначенные, в частности, для обоснования тактических характеристик новых образцов вооружения.

После 1980-х гг. развитие военных моделей шло по нескольким направлениям: а) разработка модели военной кампании (включая вопросы мобилизации, развертывания войск), б) интеграция моделей разных уровней, в) многокритериальные модели применения вооруженных сил в различных ситуациях.

С. Бондер извлек следующие уроки из своего 40-летнего опыта моделирования военных и боевых действий [424].

Во-первых, моделирование боевых действий – это скорее искусство, чем наука.

Во-вторых, наставничество имеет решающее значение. Требуется 10-15 лет, чтобы подготовить опытного аналитика, способного проводить независимый анализ, своевременно дающий полезные результаты и рекомендации, которые могут выдержать детальную техническую экспертную оценку.

В-третьих, именно аналитик, а не модель, дает значимые и полезные результаты. Слишком много ресурсов тратится на «программы улучшения моделей» и слишком мало – на улучшения работы военных аналитиков.

В-четвертых, следует избегать гипотетических показателей типа огневой мощи (firepower scores) в качестве основного критерия.

О развитии исследования операций в нашей стране можно судить по работам [80; 92; 107; 165; 371; 375].

Несмотря на впечатляющие результаты, к настоящему времени сложилась парадоксальная ситуация. «Исследование операций» сегодня – это область прикладной математики, изучающая решение прикладных математических задач моделирования операций (целенаправленных действий): явлений экономики, производства, социальных и военных систем и т. д. Отсутствие ясно определенного предмета привело к тому, что все сводится к набору отдельных задач, которые ученые могут сегодня решить [247, с. 153].

В силу различных причин как объективного (закрытость информации), так и субъективного характера обмен научными результатами между представителями военной и академической науки не всегда был организован должным образом. В качестве хрестоматийного примера можно привести семинары в МИАНе, организованные академиком Львом Семеновичем Понтрягиным, на которых постановки математических задач черпались из нужд естествознания и техники (так, например, побудительным мотивом к разработке известного принципа максимума Понтрягина послужило обращение теоретика и инженера-практика А. А. Фельдбаума).

Известно, что в науке идеи теории игр получили широкое распространение после публикации в 1944 г. книги Дж. фон Неймана и О. Моргенштерна «Теория игр и экономическое поведение». Вместе с тем, Г.К. Жуков, начиная с 1943 г., руководствовался идеями «смешанных стратегий» при планировании стратегических наступательных операций (прорыв обороны противника, см. раздел 4.3.4) [309]. Однако, насколько известно авторам, конкретные исторические примеры использования смешанных стратегий при планировании и ведении боевых действий в отечественных учебниках по исследованию операций отсутствуют.

Есть основания утверждать, что в результате развития математических методов исследования операций и смежных дисциплин прикладной математики (теория игр и др.) появились условия для системного решения актуальных задач военной науки в рамках военной кибернетики.

### 1.1.2. Кибернетический этап

**Кибернетика в XX веке.** В истории развития науки середина 1940-х годов характеризуется как «романтический» период, что обусловлено несколькими факторами [255].

*Первый фактор* – интенсивный поток научных и прикладных результатов:

- физика преодолела кризис начала XX века (произошло рождение и активное развитие атомной физики, квантовой механики, общей и специальной теорий относительности, астрофизики; уже взорвана первая атомная бомба (1945) и скоро будет запущена первая атомная электростанция (1954));

- электро- и радиотехника вошли в жизнь обывателя;

- происходит череда открытий в биологии, физиологии и медицине (промышленно производимый (1941) пенициллин уже спас миллионы жизней, вот-вот будет открыта трехмерная модель спирали ДНК (1953), активно развиваются радиобиология и генетика и т. д.);

- созданы первая ЭВМ (1945) и биполярный транзистор (1947);

- скоро (1951) появится теория выбора, только что родились теория игр (1944) и исследование операций (1943), являющиеся ярким примером междисциплинарной синтетической науки.

*Второй фактор* – осознание учеными, являющимися представителями различных отраслей науки в целом, ее междисциплинарности, заключающейся в существовании общих (для разных наук) подходов и закономерностей, а также в возможности адаптированной трансляции результатов из одних областей в другие. Это приводит к пониманию необходимости стремления к обобщениям, причем не только в рамках той или иной конкретной отрасли знания, не только на их стыке, но, в первую очередь, на их «пересечении». Другими словами, речь идет о принципиально новой возможности получения прорывных результатов совместными усилиями физиков и биологов, математиков, инженеров и физиологов и т. д.

*Третий фактор* заключается в том, что роль и «польза» науки становятся очевидными и обывателю (пользующемуся ее быстро и массово внедряемыми в «производство» результатами), и политику (который осознает, что наука стала важной общественной и экономической силой общества, и привыкает к тому, что проектный способ управления прикладными исследованиями и разработками позволяет прогнозировать и отчасти гарантировать их сроки и результаты).

На волне такого научного «романтизма» в 1948 г. зародилась кибернетика, пережившая как романтическое детство, так и разочарования юности и упадки зрелости.

Приведем определения ключевых понятий. *Кибернетика* (от др.-греч. *κυβερνητική* – «искусство управления») – наука об общих закономерностях процессов управления и передачи информации в различных системах, будь то машины, живые организмы или общество [255; 577]. *Управление* (control) – воздействие на управляемую систему, нацеленное на обеспечение требуемого ее поведения [337]. *Информация* (information) – 1) сообщение, осведомление о положении дел, сведения о чем-либо; 2) уменьшаемая, снимаемая неопределенность в результате получения сообщений; 3) сигналы в единстве синтаксических, семантических и прагматических характеристик; 4) передача, отражение разнообразия в любых объектах и процессах (живой и неживой природы). *Система* (system) – совокупность элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которая образует определенную целостность, единство [337].

В Древней Греции термин «кибернетика» использовался для обозначения искусства государственного деятеля, управляющего городом (например, в «Законах» Платона). Римское слово «кюбернетес», означающее «губернатор», также родственно слову «кибернетика». В своей классификации наук А. Ампер (1834) относил кибернетику (как «науку управления вообще») к политическим наукам – в своей книге «Опыт философских наук» кибернетику он определил как науку о текущей политике и практическом управлении государством (обществом).

Б. Трентовский (1843) определял кибернетику как «искусство управления народом». А. А. Богданов в своей «Тектологии» (1925) исследовал организационные принципы, общие для всех видов систем.

Основоположник современной кибернетики Н. Винер в интервью журналу «Вопросы философии» (1960, № 9) говорил: «Цель состояла в том, чтобы объединить усилия в различных отраслях науки, направить их на единообразное решение сходных проблем».

Н. Винером развивалась идея о том, что в общем смысле целесообразно рассматривать следующие «кирпичи мироздания» – 1) элементы, 2) устройства, 3) системы, 4) связи, 5) управление и 6) информацию. Первые три «кирпича» образуют произвольную структуру, четвертый характеризует ее целостность, пятый – выполняемые функции, а шестой – смысловое назначение [85].

Важным результатом этой идеи явилось становление модельного мышления в науке и инженерных дисциплинах: для характеристики системы

необходимо описывать не только ее состав, но и множество состояний, в которых она может находиться (это позволяет при исследовании заменить реальный прототип его математической или физической моделью). Кроме того, стала понятна ведущая роль управления в системе – управление определяет целесообразность поведения системы.

Развитие кибернетики как науки было подготовлено многочисленными работами ученых в области философии, математики, механики, автоматического управления, вычислительной техники, физиологии высшей нервной деятельности. Основы теории автоматического регулирования и теории устойчивости систем регулирования содержались в трудах выдающегося русского математика и механика И. А. Вышнеградского (1831–1895), разработавшего теорию и методы расчета автоматических регуляторов паровых машин. Труды одного из крупнейших математиков своего времени А.М. Ляпунова (1857–1918) сыграли огромную роль в разработке теоретических вопросов технической кибернетики, в частности, общей задачи устойчивости движения, являющиеся фундаментом современной теории автоматического управления.

Принцип обратной связи (ошибочно приписываемый Н. Винеру) был сформулирован в середине 1930-х годов П.К. Анохиным, да и «Тектология» А.А. Богданова явно является четвертьвековой предтечей кибернетики.

Исследованием процессов управления в живых организмах занимались известные отечественные физиологи – И.М. Сеченов (1829–1905) и И.П. Павлов (1849–1936). Их труды положили начало развитию биологической кибернетики.

Благодаря ЭВМ возникли принципиально новые возможности для исследования и создания сложных управляющих систем. Быстрое развитие вычислительной техники породило большой интерес к кибернетике в 1960–1970-е гг. и ее бурное развитие во всем мире. В 1980–1990-е гг. термин «кибернетика» был частично вытеснен термином «информатика», имеющим отношение, прежде всего, к компьютерам и обработке информации. Однако в последние годы кибернетика вновь стала популярной в связи с развитием Интернета (киберпространство) и робототехники.

**Кибернетика и информатика.** На сегодняшний день и кибернетика, и информатика являются самостоятельными междисциплинарными фундаментальными науками. По образному выражению Б. В. Соколова и Р. М. Юсупова, информатика и кибернетика являются «сиамскими близнецами», однако в природе сиамские близнецы все-таки являются патологией. Определение кибернетики, например, как «объединения» общих законов информатики и

управления породило бы меганауку, лишенную конкретного содержания и обреченную на вечное нахождение на концептуальном уровне [255, с. 111].

Кибернетика и информатика сильно пересекаются. Но акценты у них существенно различаются. Если фундаментальные идеи кибернетики – это винеровские «управление и связь в животных, машине и обществе», то фундаментальные идеи информатики – это формализация (в теории) и компьютеризация (на практике). Соответственно, если базовой математической основой кибернетики является теория управления и теория информации, то основой информатики является теория алгоритмов и формальных систем.

Предмет современной информатики, охватывающей сегодня и компьютерные, и информационные направления (в зарубежной терминологии – Information Science, Computer Science и Computational Science), – информационные процессы.

Действительно, с одной стороны, обработка информации в широком смысле нужна всюду, а не только в управлении. С другой стороны, информационные процессы и соответствующие технологии уже настолько интегрированы в процессы управления, что разделить их почти невозможно, и тесное взаимодействие информатики и кибернетики будет продолжаться и расширяться.

**Военная кибернетика.** Эволюция («филогенез» по Д. А. Новикову) винеровской кибернетики показана на рис. 1.1.1.

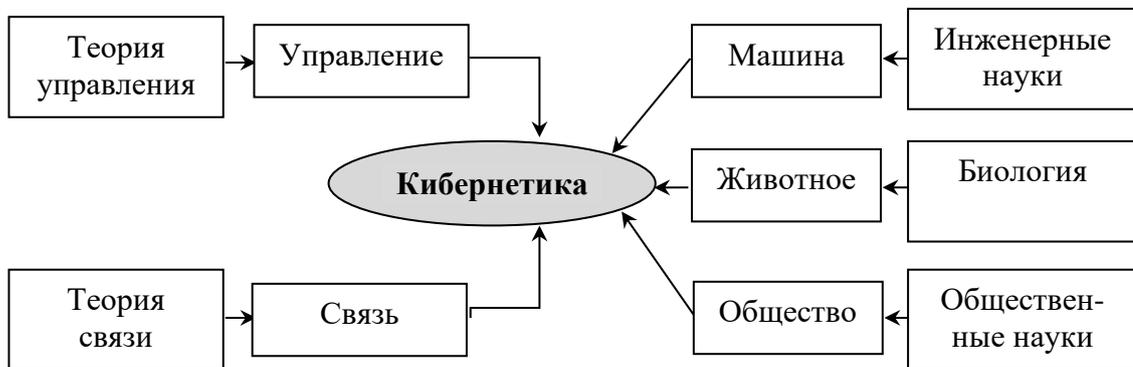


Рис. 1.1.1. «Филогенез» винеровской кибернетики

Наряду с общей кибернетикой, выделяют и *специальные* («отраслевые») *кибернетики*. Самым естественным (следующим из расширенного определения Н. Винера) является выделение, помимо *теоретической кибернетики*, трех базовых кибернетик: технической, биологической и социально-экономической (см. рис. 1.1.1). Возможно и более полное перечисление – см. ссылки в [255]. Одной из «отраслевых» кибернетик является *военная кибернетика*.

О развитии военной кибернетики в СССР можно судить, например, по публикациям А. Л. Лифшица (1964) [206], В. П. Давыденко и др. (1970) [128], С. К. Васильева и др. (1979) [71], Д. А. Поспелова и Я. И. Фета (1998) [278]. В 1960-х годах, занимаясь исследованиями в области военной кибернетики, В. А. Лефевр создал теорию рефлексивных игр [203].

Отдельного внимания заслуживает работа Виталия Николаевича Цыгичко «Модели в системе принятия военно-стратегических решений в СССР» [359], в которой дается описание математической модели стратегической операции на континентальном ТВД и показывается практика ее использования.

Автор отмечает, что «наиболее важной и трудно разрешимой проблемой при планировании крупномасштабных операций было и остается прогнозирование хода и исхода боевых действий в зависимости от начального соотношения сил сторон и условий ведения операций. Практически все задачи оперативного планирования, в том числе и в настоящее время, связаны с решением этой проблемы» [359, с. 25].

Проект разработки модели стратегической операции был представлен в Генштаб ВС СССР в 1969 г. В соответствии с техзаданием модель предназначалась для решения следующих задач:

- определение потребных сил и средств на операцию в зависимости от целей и задач операции, состава и возможностей группировки противника и условий боевых действий на театре;
- проверка и уточнение замысла и плана операции;
- оценка целесообразности и эффективности управленческих решений в различных ситуациях и вариантах боевых действий в ходе операции;
- определение потребностей в боевом и тыловом обеспечении;
- оценка оперативной эффективности нового вооружения и техники;
- определение и уточнение оперативно-тактических боевых нормативов;
- подготовка и проведение штабных и войсковых учений и др. задачи.

Результаты моделирования должны были отражать состояние войск сторон на каждые сутки боевых действий и содержать:

- структуру и составы войск сторон в принятом оперативном построении;
- потери сторон в живой силе, вооружении и технике в каждой полосе и зоне оперативного построения за каждые сутки боевых действий и с начала операции;
- положение линии фронта и перемещение войск сторон;
- время и место использования сторонами вторых эшелонов и резервов.

Для разработки модели сначала была создана лаборатория, а позже отдел. В ходе опытной эксплуатации системы моделирования на БЭСМ-4 было принято решение о разработке отдельных моделей фронтовой и армейской операции, моделей общевойскового боя, связанных между собой по информации и идеологии построения. Перечисленные модели создавались отдельными отделами, руководить которыми были назначены разработчики модели уровня ТВД, что позволило организовать обучение нового поколения разработчиков и обеспечить совместимость программ разного уровня.

К концу 1970-х гг. Генштаб ВС СССР имел в своем распоряжении систему взаимоувязанных моделей боевых действий различного масштаба. В основу информационных моделей была положена расчетная единица – наименьший элемент в структурах противостоящих группировок войск, внутреннее строение которого не рассматривается на принятом уровне описания операции. На стратегическом уровне в качестве расчетной единицы принималась дивизия, на оперативно-тактическом уровне – батальон или рота.

При расчете потерь сторон учитывался опыт второй мировой войны. В частности, полагалось, что если первый эшелон наступающей дивизии понес перед атакой 30 и более процентов потерь, то полагается, что дивизия становится временно неспособной вести наступление<sup>1</sup>. Если же такие потери понесла обороняющаяся сторона, то ее боевые возможности по отражению атак противника снижаются пропорционально уровню потерь, превышающих 30%. Обороняющиеся дивизии сохраняют боеспособность до 60% потерь личного состава, наступающие – до 40%. В модели также учитывается тот факт, что эффективность действия оружия обороняющейся стороны выше, чем у атакующей, и эта разница зависит от степени подготовки оборонительных позиций, условий местности, времени года и погоды.

Разработанные модели использовались в ходе учений и в научных исследованиях, а также в учебном процессе Академии Генштаба.

Модели боевых действий разрабатывались и с привлечением ученых из институтов Академии наук СССР. Одна из таких моделей, в которой рассчитывается темп боевого перемещения в зависимости от отношения эффективных сил сторон, представлена в книге «Принципы построения моделей» [188].

---

<sup>1</sup> Данный критический процент потерь наступающими подтверждается и опытом первой мировой войны. Исследуя и прогнозируя ход армейских операций, В.К. Триандафиллов отметил, что потери наступающих дивизий в 27-35% приведут к тому, что они окажутся небоеспособными [342, с. 187]. См. также раздел 4.2.2 ниже.

Внедрение компьютеров в науку и управленческую практику привело к бурному развитию методов *имитационного моделирования* (англ. simulation modeling – метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему; см. также раздел 5.1 ниже). Имитационное моделирование, как частный случай математического моделирования, обычно применяется в следующих случаях: а) дорого или невозможно экспериментировать на реальном объекте, б) невозможно построить аналитическую модель, в) необходимо симитировать детальное поведение системы во времени.

К настоящему времени хорошо развиты и реализованы в компьютерных программах следующие виды имитационного моделирования (см., например, учебное пособие по имитационному моделированию [397], труды конференций по имитационному моделированию и его применению в военной сфере в России [196] и за рубежом [568]).

*Дискретно-событийное моделирование*, когда функционирование системы представляется как хронологическая последовательность стохастических событий (процессно-ориентированный подход).

*Системная динамика* – парадигма моделирования, где для исследуемой системы строятся графические диаграммы причинных связей и глобальных влияний одних параметров на другие во времени, а затем созданная на основе этих диаграмм модель имитируется на компьютере.

*Агентное моделирование* – относительно новый вид имитационного моделирования, в котором свойства исследуемой системы являются результатом действий агентов, поведение которых задается алгоритмами, функциями и т. д. (моделирование «снизу вверх»).

В последние десятилетия развитие теории управления и военного дела стимулируется тенденциями «миниатюризации», «децентрализации», «интеллектуализации» систем, которые состоят из большого числа взаимодействующих между собой агентов технической, социальной или информационной природы. Такие свойства *мультиагентных систем* (МАС) как децентрализованность взаимодействия и множественность агентов дают их качественно новые эмерджентные свойства (автономность, меньшая уязвимость к неблагоприятным воздействиям и др.), важные во многих приложениях. МАС условно могут быть разделены на технические (мобильные роботы, БЛА, автономные необитаемые подводные аппараты и др.) и программные (софт-боты – автономные программные модули, решающие задачи распределенной оптимизации). Назревает переход от парадигмы «си в кубе»  $S^3$ , когда

совместно решаются задачи управления, вычислений и связи (Control + Computations + Communications), к концепции «си в пятой» (C5) – Control + Computations + Communications + Costs + lifeCycle, когда упомянутые задачи должны решаться в комплексе с учетом стоимостных (в широком смысле) аспектов на протяжении всего жизненного цикла рассматриваемой системы, включая, в т.ч., этап совместного проектирования управляющей системы и объекта управления. Сегодня чрезвычайно моден подход, называемый «сетевым центризмом» и включающий принципы организации и исследования любых сетей вообще и, в частности, «собирающихся» на время выполнения боевой задачи – в нужное время и в нужном месте [255, с. 75-78].

О развитии подходов к оценке сил сторон и боевых потенциалов в СССР, современной России и США можно ознакомиться по исследованию RAND Corporation «Russian Assessments and Applications of the Correlation of Forces and Means» [540]. В исследовании отмечаются нерешенные проблемы с оценкой боевых потенциалов и возможностей расчетных единиц, поскольку непонятно, как оценивать боеспособность средства или формирования во всех возможных ситуациях и как усреднять полученные значения. В США подходы к оценке соотношения сил сторон были примерно такие же, как и в СССР. В связи с возникшими трудностями по оценке боевых возможностей соединений через возможности образцов вооружения и подразделений, неопределенностями экспертных оценок, в армии США в 1980-х гг. подобные методики утратили былую популярность. Для командиров исследователи стали готовить справочные таблицы, по которым для типовых условий и возможностей сторон можно было посмотреть полученное соотношение сил сторон и оценить возможные потери.

По оценкам специалистов РЭНД, несмотря на имеющиеся трудности методологического и технического характера, Россия (как и другие страны) вероятно пойдет по пути совершенствования математических моделей и методов для помощи командующим (командирам) в принятии решений [540].

Таким образом, сомнения в существовании «сегодня» кибернетики (включая военную) и аргументы в ее защиту стали высказываться, начиная с середины 80-х годов XX века. После «романтического» периода настал период быстрого получения результатов, который привел к росту ожиданий. Эти ожидания были не всегда профессиональны. Кибернетика стала модной, ее стали популяризировать, и число популяризаторов иногда превышало число профессионалов (справедливости ради, надо признать, что и у профессионалов оправдались далеко не все ожидания).

Подобная ситуация, наверное, вообще типична для развития областей науки и научных направлений. Теория нечетких множеств, аппарат искусственных нейронных сетей, подходы генетических алгоритмов и многие другие научные направления в свое время в той или иной степени прошли или проходят сейчас через кризис, возникший в результате краха соответствующих завышенных ожиданий.

На самом деле, не всё так плохо. Кибернетика вполне успешна как интегративная наука, так как ее составляющие развивались, интенсивно развиваются и будут развиваться, а наличие единого взгляда и целостной картины взаимосвязи целой группы наук, несомненно, необходимо. Рефлексия же относительно разочарований и их причин всегда полезна.

Военная кибернетика прошла путь от математического и информационного моделирования боевых действий к экспертным оценкам и квалиметрическим моделям. Разработано множество моделей на уровне отдельных родов войск, значимые результаты моделирования и исходные данные для расчетов прошли проверку на военных полигонах и учениях. Рядом исследователей отмечается, что к настоящему времени сложились благоприятные условия для создания и развития комплексных моделей боевых и военных действий различного масштаба, моделей обеспечения безопасности и обороноспособности (см., например, [283]).

## **1.2. Современные кибернетика, теория систем и системный анализ**

В настоящем разделе рассматривается текущее состояние кибернетики и ее взаимосвязь с другими науками.

### ***1.2.1. Кибернетика и философия управления***

С исторической точки зрения до определенного периода времени (примерно XVI-XVII века) исследование проблем управления (впрочем, как и предметов большинства других современных наук) было прерогативой философии.

Историко-философский анализ дает основание заключить, что первыми теоретиками управления были именно философы Конфуций, Лао-Цзы, Сократ, Платон, Аристотель, Н. Макиавелли, Т. Гоббс, И. Кант, Г. Гегель, К. Маркс, М. Вебер, А.А. Богданов – все эти и многие другие философы создали концептуальную основу для появления современной науки управления, для развития и совершенствования управленческой практики [232].

На рис. 1.2.1 представлены различные связи между категориями философии и управления, трактуемыми максимально широко, то есть, включая в философию онтологию, гносеологию, логику, аксиологию, этику, эстетику и т. д.; а управление рассматривая и как науку, и как вид практической деятельности [196].



Рис. 1.2.1. Философия и управление

На сегодняшний день конкретные проблемы управления уже перестали быть предметом собственно философского анализа. Действительно, философия (как форма общественного сознания, как учение об общих принципах бытия и познания, об отношении человека к миру, как наука о всеобщих законах развития природы, общества и мышления) изучает общие проблемы и закономерности, выделенные специалистами тех или иных конкретных наук.

Д. А. Новиков определяет *философию управления* как раздел философии, связанный с осмыслением, интерпретацией управленческих процессов и управленческого познания; исследующий сущность и значение управления. Это значение термина «философия управления» имеет свою богатую внутрен-

ную структуру и включает гносеологические исследования науки об управлении, изучение логических, онтологических, этических и других оснований, как науки об управлении, так и управленческой практики.

Как отмечает В. С. Диев, «... для большинства академических дисциплин существует круг вопросов, которые относят к их основаниям и традиционно обозначают как философию соответствующей науки, управление не является исключением в этом ряду» [132, с. 36].

В 70-е-90-е годы XX века, на фоне первых разочарований носителями канонических кибернетических традиций оставались, как ни странно, философы, а специалисты по теории управления отчасти утратили веру в могущество кибернетики.

Но так продолжаться до бесконечности не может. С одной стороны, философам жизненно необходимы знания о предмете, причем знания уже обобщенные. Действительно, как отмечает В. В. Ильин, «Философия есть рефлексия второго порядка; она является теоретизацией иных способов духовного производства. Эмпирический базис философии – специфические отражения различных типов сознания; философия тематизирует не в себе и саму по себе реальность, а обработки и проработки реальности в образных и категориально-логических формах» [150].

С другой стороны, Кибернетика (с большой буквы, исследующая наиболее общие теоретические закономерности) должна и будет играть роль «философии» управления (употребление кавычек существенно).

### ***1.2.2. Методология управления***

*Методология* – это учение об организации деятельности. Соответственно, предмет методологии – организация деятельности (деятельность – целенаправленная активность человека) [247].

Управленческая деятельность является одним из видов практической деятельности. Методология управления является учением об организации управленческой деятельности, то есть деятельности субъекта управления (в случае, когда управляемая система включает человека, управленческая деятельность является деятельностью по организации деятельности). Теория управления акцентирует свое внимание, в основном, на взаимодействии субъекта и «объекта» управления (в роли последнего может выступать другой субъект) – см. рис. 1.2.2, в то время как методология управления исследует

деятельность субъекта управления и, следовательно, должна включаться в рамки Кибернетики.



Рис. 1.2.2. Методология управления и наука об управлении

Развитие методологии управления позволило сформулировать структуру управленческой деятельности (см. [252]), в том числе в случае комплексной деятельности (см. [45]).

Центральным системообразующим элементом теории управления (социальными, организационными и др. системами междисциплинарной природы) является категория *организации*, так как управление включает в себя процесс организации, в результате которого в управляемой системе появляется организация как свойство [252].

Подробное описание компонентов теории управления можно найти в книгах [252; 255].

### 1.2.3. Теория систем и системный анализ

Содержание кибернетики неразрывно связано (причем, как логически, так и исторически) с категорией «система» (см. определение выше), и здесь ключевыми являются два термина – системный подход и системный анализ.

С точки зрения истории, «системный анализ» (как анализ систем – Systems Analysis) появился в рамках общей теории систем (ОТС, GST – General Systems Theory), основателем которой является биолог Людвиг фон Берталанфи, предложивший в 30-е годы XX века концепцию открытой системы [421]. В 1950-е гг. на основе лекций, прочитанных сотрудниками корпорации РЭНД руководящим работникам министерств обороны и промышленности США, подготовлена коллективная монография (см. ее переводное советское издание [19]). Во введении утверждается, что анализ систем не является понятием,

связанным исключительно с военными системами, и «представляет собой подход к рассмотрению или способ рассмотрения сложных проблем выбора в условиях неопределенности» [19, с. 27].

Структура монографии «Анализ сложных систем: Методология анализа при подготовке военных решений» такова:

1. *Введение.*

2. *Анализ и принятие решений в военно-воздушных силах* (подготовка решений по структуре и разработке вооружения, подробное рассмотрение неопределенностей, противник, учет фактора времени, расширение критериев).

3. *Выбор и использование стратегических авиационных баз* (постановка задачи, альтернативы, решающие факторы, план анализа, неопределенность в оценке возможностей противника, ограничения эффективности систем и их гибкость).

4. *Зачем и каким образом создается модель* (выявление релевантных<sup>1</sup> факторов, выбор количественно описываемых факторов, их объединение в группы, установление количественных соотношений между элементами, создание модели, суждения человека).

5. *Критерии* (неизбежность приближенных критериев, субоптимизация<sup>2</sup> и критерии, некоторые ошибки при выборе критериев).

6. *Значение затрат* (заданный объем ресурсов при одной и нескольких целях, переменный объем затрат ресурсов, частные аспекты проблемы).

7. *Анализ и построение конфликтных систем* (история межконтинентальных боевых действий, цели и ограничения системных исследований, параллельные и отдаленные цели, происхождение и изменение целей, сдерживание, ведение войны, противодействие и содействие противника, малая ценность взаимно неудовлетворительных стратегий, неопределенность и определение диапазона достижимых целей, проектирование систем в сравнении с анализом систем).

8. *Методы и процедуры* (инженерное искусство, методологические вопросы анализа систем).

9. *Фактор техники* (технические характеристики, параметры уровня развития техники, законы масштабности, оптимум и ограничения, фактор

---

<sup>1</sup> Релевантный это: 1) важный, существенный; 2) уместный, актуальный в определенных обстоятельствах; 3) способный служить для точного определения чего-либо.

<sup>2</sup> Под субоптимизацией авторы понимают разбиение сложной проблемы на подзадачи и оптимизацию последних.

надежности).

10. *Предположения о поведении противника* (пример проблемы выбора системы оружия из нескольких ее вариантов<sup>1</sup>, всесторонняя стратегия).

11. *Методы теории игр и их применение* (использование и методика военных игр – математических, машинных, управленческих и с посредником).

12. *Стратегия разработок* (оценка неопределенности и меры по ее снижению, затраты на снижение неопределенности).

13. *Математика и анализ систем* (линейное программирование, метод Монте-Карло, теория игр, ЭВМ, роль математики).

14. *Применение ЭВМ* (преимущества и недостатки ЭВМ, программирование модели, постановка задачи, языки программирования, заключение).

В дальнейшем судьба системного анализа в СССР (а затем – в России) и за рубежом была различной. Начнем с того, чем различались (и различаются сейчас) трактовки этого термина. Начнем с традиций русскоязычной научной литературы.

**Системный подход** – направление методологии научного познания и общественной практики, в основе которого лежит исследование объектов как систем: целостного<sup>2</sup> множества элементов в совокупности отношений и связей между ними<sup>3</sup>. Системный подход способствует адекватной постановке проблем в конкретных науках и выработке эффективной стратегии их изучения.

Системный подход является общим способом организации деятельности, который охватывает любой род деятельности, выявляя закономерности и взаимосвязи с целью их более эффективного использования.

**Системный анализ** – практическая «методология» решения проблем – совокупность методов, ориентированных на исследование сложных систем – социальных, военных, экономических, технических, экологических, образовательных и т. д.

Результатом *системных исследований* является, как правило, выбор вполне определенной альтернативы: плана развития организации, региона, параметров конструкции и т. д. Ценность системного подхода состоит в том, что рассмотрение категорий системного анализа создает основу для логического и последовательного подхода к проблемам управления и принятия

---

<sup>1</sup> Проведение исследований военных систем со своей точки зрения и с точки зрения противника. Заполнение и анализ матрицы игры.

<sup>2</sup> Целостность, подчиненность единой цели является системообразующим фактором.

<sup>3</sup> Совокупность устойчивых связей между элементами системы, обеспечивающих целостность и самоидентичность последней, называется ее структурой.

решений. Эффективность решения проблем с помощью системного анализа определяется структурой решаемых проблем.

Системный анализ, отличаясь междисциплинарным положением, рассматривает, в частности, деятельность как сложную систему, направленную на подготовку, обоснование и реализацию решения сложных проблем: политического, социального, экономического, технического и т. д. характера.

Для решения хорошо структурированных и количественно выражаемых, формализуемых проблем используются методы оптимизации и исследования операций, то есть строится адекватная математическая модель, в рамках которой ищутся оптимальные целенаправленные действия (управление). Для решения слабоструктурированных (слабоформализуемых) проблем используются различные методики, включающие типовые этапы, содержащие ряд распространенных подходов к системному и стратегическому анализу решения проблем. Системный анализ при этом обладает универсальностью методов решения проблем: общие подходы для самых разных областей – организационного управления, экономики, военного дела, инженерных задач и др.

Таким образом, в СССР системный анализ рассматривался наряду с общей теорией систем (а затем почти «поглотил» её) как совокупность общих принципов рассмотрения любых систем (системный подход). В термине «системный анализ», как и в кибернетике, рассматривая его как интегративную науку, можно выделить «зонтичное» определение – как объединение под эгидой «системности» различных наук-составляющих: искусственный интеллект, исследование операций, теория принятия решений, системотехника и др. С этой точки зрения системный анализ почти не имеет корпуса собственных результатов.

Вторая трактовка системного анализа (будем называть его *Системным анализом* с большой буквы) – как общие законы, закономерности, принципы и т. д. функционирования и исследования систем различной природы. Здесь основной корпус результатов составляют философские и концептуальные аспекты системного анализа и общей теории систем.

**Теория систем и системная инженерия.** Переходя к анализу «системной» терминологии в англоязычной литературе, следует обратить внимание, что высокий уровень абстрагирования и общности системных исследований в СССР и России соответствует англоязычным терминам «General Systems Theory» (первоначально) и «Systems Science» (в наши дни). То есть сегодня русскоязычному термину «системный анализ» соответствует, скорее, англоязычный «Systems Science» (SS – науки о системах, системные исследования).

Общая теория систем за рубежом получила несколько направлений развития. Во-первых, в ее «мэйнстриме» родились два поднаправления – теория системных классов К. Боулдинга и методология мягких систем П. Чекланда (Soft Systems Methodology).

Во-вторых, отдельно следует отметить, что в 50-70-ые годы XX века значительное развитие получила математическая теория систем (Mathematical System Theory), фактически слившаяся затем с теорией управления.

В-третьих, естественно, следует упомянуть системную динамику, исследующую влияние свойств элементов системы и ее структуры на поведение системы во времени. Основным аппаратом здесь является имитационное моделирование систем дифференциальных уравнений или дискретных отображений<sup>1</sup>.

Возвращаясь к системному анализу, отметим, что Systems Analysis (SA) дословно переводится не как «системный анализ», а как «анализ систем» (различие значений этих терминов на русском языке очевидно). Анализом систем в широком смысле может быть названо любое аналитическое исследование, направленное на то, чтобы помочь руководителю, ответственному за принятие решений, в выборе предпочтительного курса действий.

В дальнейшем, за рубежом SA развивался в направлении Systems Engineering (SE), т. е. системотехники – направления науки и техники, охватывающего весь жизненный цикл (LifeCycle) – проектирование, создание, испытание, эксплуатацию, сопровождение, обслуживание и ремонт, модернизацию и утилизацию – сложных систем. В наши дни для SE организационно-технических систем на русском языке используют термин системная инженерия.

Со временем SA превратился в практико-ориентированные технологии анализа конкретных систем – продуктов и/или услуг, причем этап анализа системы рядоположен с ее дизайном (SD – Systems Design), развитием (Systems Development) и т. д.

Разделы «системных исследований» сегодня являются, скорее, не научными направлениями, а совокупностью технологий и единого языка, сформулированных в виде стандартов, появившихся в результате обобщения успешного опыта практической деятельности.

**Системы систем.** Интенсивно развивающимся направлением теории систем и системной инженерии является проблематика так называемой «системы систем», рассматривающая взаимодействие автономных (самодостаточ-

---

<sup>1</sup> Простейшее дискретное отображение, это уравнение вида  $x_{n+1} = f(x_n)$ . Ознакомьтесь с введением в теорию дискретных отображений можно по статье [194].

ных) систем, которые в совокупности образуют целостную систему (со своими целями, функциями и т. д.). Примерами являются сети сетей, SmartGrid в энергетике, взаимодействие подразделений и родов войск в военном деле, сложные производства и т. п.

### **1.3. Военная кибернетика как научная дисциплина**

*Военная кибернетика* первоначально определялась как наука, изучающая «общие закономерности процессов управления войсками, боевой техникой и средствами поражения с целью повышения эффективности их боевого применения» [112, с. 448]. Именно исследование проблемы создания автоматизированных систем для ПВО натолкнуло Н. Винера на мысль о целесообразности выделения общих закономерностей управления и связи в живой природе и технике в новую научную область, названную им кибернетикой [112, с. 448].

В изданной в 1972 г. книге «Кибернетика в бою» Ю. Н. Сушков отметил, что иногда все области военного применения кибернетики объединяют термином «военная кибернетика». Но в последнее время этот термин сужается. Так системы автоматического регулирования военных устройств относятся к компетенции технической кибернетики, ведь их военная специфика не имеет существенного значения при кибернетическом исследовании. Тогда «на долю военной кибернетики остается исследование кибернетическими методами процессов управления войсками». «Алгоритмы управления войсками в бою – один из главных предметов исследования военной кибернетики». Математическую основу военной кибернетики составляют: исследование операций, теория игр, математическое моделирование, теория массового обслуживания [330, с. 11-12].

Энциклопедия РВСН под военной кибернетикой понимает направление (раздел) кибернетики, «в котором на основе единых для нее понятий и методов исследования изучаются закономерности создания и использования кибернетических систем военного назначения и вырабатываются практические

рекомендации по управлению войсками и оружием»<sup>1</sup>. Ее основная цель – максимальное повышение боевых возможностей войск, оружия и эффективности их боевого применения.

Н. Н. Тютюнников под военной кибернетикой понимает «одно из направлений кибернетики, изучающее общие закономерности управления войсками и оружием на основе единых для кибернетики понятий» [346, с. 146]. К кибернетическим понятиям автором, в частности, отнесены информационное и кибернетическое пространства.

С военной кибернетикой тесно связана *военная информатика*, под которой понимается отрасль информатики, «изучающая цели, способы и средства автоматизации деятельности органов управления и должностных лиц на базе электронно-вычислительной техники и средств телекоммуникации при управлении войсками и боевыми средствами, разработке новых систем оружия, совершенствовании видов, форм и способов боевых действий, обучении личного состава». Военная информатика «занимается изучением процессов поиска, получения, обработки, хранения и передачи информации военной, а также решением проблем разработки, внедрения и эксплуатации автоматизированных информационных систем военного назначения, реализующих применимые в военном деле информационные технологии»<sup>2</sup>.

В отчете «Global Military Artificial Intelligence (AI) and Cybernetics Market: Focus on Platform, Technology, Application and Services – Analysis and Forecast, 2019-2024»<sup>3</sup> представлены результаты исследований в области военного искусственного интеллекта и кибернетики. Основная область приложений военной кибернетики – обороноспособность и пограничная безопасность.

По мнению авторов отчета наиболее перспективны исследования в следующих областях применения: разведка и наблюдение; боевые платформы; логистика и транспортировка; автономное оружие и системы наведения; полевая медицина; моделирование боевых действий.

---

<sup>1</sup> Кибернетика военная. – URL: <https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=13254@morfDictionary> (дата обращения – 25.02.2024).

В данном определении военная кибернетика определена через термин «кибернетические системы военного назначения», который не определен и почти не используется в научных работах.

<sup>2</sup> Военная информатика. – URL: <https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=12802@morfDictionary> (дата обращения – 25.02.2024).

<sup>3</sup> Military Artificial Intelligence & Cybernetics. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/military-artificial-intelligence--cybernetics--world-markets-to-2024---rising-demand-for-next-generation-battlefield-technologies-presents-lucrative-opportunities-300962307.html> (дата обращения – 25.02.2024).

За последние десятилетия появились новые научные и технологические достижения, изменились взгляды на обеспечение национальной безопасности и обороноспособности. Эти и другие факторы требуют уточнения предметной области военной кибернетики и выявления предпосылок и условий для ее дальнейшего развития.

### **1.3.1. Военная кибернетика 2.0 и ее предметная область**

Следуя логике Ю. Н. Сушкова, предварительно укажем, что не относится к военной кибернетике.

Во-первых, военная информатика – это самостоятельная отрасль знаний, рядоположенная с военной кибернетикой.

Во-вторых, теория управления вооруженными силами («исследует закономерности, принципы и методы работы командования, штабов и других органов по управлению войсками (силами) при подготовке к ведению боевых действий (операций), а также по руководству боевой учебой, жизнью и деятельностью войск (сил) в мирное и военное время» [58]) – это скорее искусство (менеджмент).

В-третьих, техническая кибернетика – научное направление, связанное с применением единых для кибернетики идей и методов при изучении технических систем управления [59].

Поскольку военная кибернетика является разделом кибернетики (науки об организации систем и управлении ими) и учитывая развитие взглядов на военную кибернетику в России и за рубежом, можно сформулировать более общее и современное ее определение: **военная кибернетика – это наука об организации военных, специальных и пограничных систем и управлении ими, предоставляющая командирам (руководителям) и штабам (органам управления) количественные основания для принятия решений.**

На рис. 1.3.1 показана предметная область<sup>1</sup> военной кибернетики.

Система обеспечения национальной безопасности – это совокупность осуществляющих реализацию государственной политики в сфере обеспечения национальной безопасности органов публичной власти и находящихся в их распоряжении инструментов [327]. Соответственно, под *военными, специаль-*

---

<sup>1</sup> Предметная область – это часть реального мира, рассматриваемая в рамках науки (теории).

ными и пограничными системами обеспечения безопасности предлагается понимать совокупность органов управления, вооруженных, пограничных и других сил, имеющих в их распоряжении средств, вооружения и военной техники, деятельность которых направлена на обеспечение национальной безопасности, защиту и охрану государственной границы.

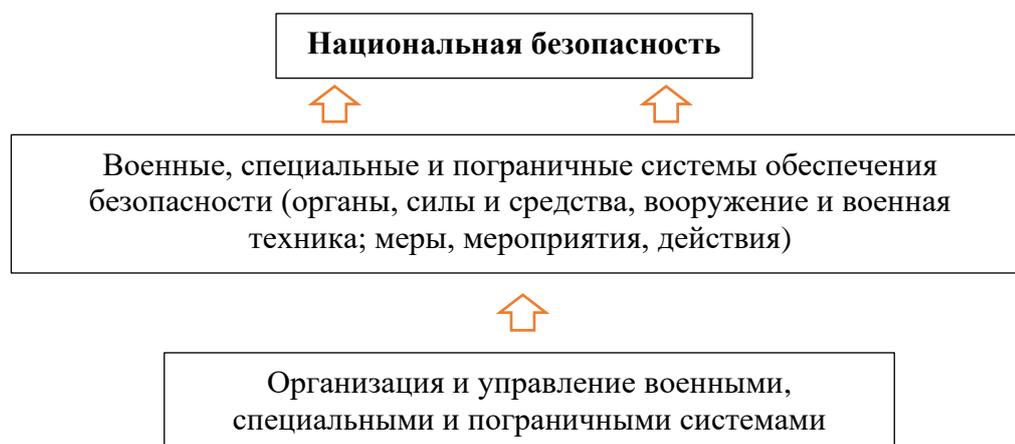


Рис. 1.3.1. Предметная область военной кибернетики

Очерченная предметная область военной кибернетики обладает двумя свойствами.

Первое свойство – *полнота (дуализм проектов и процессов)*. Военные и специальные системы имеют дело с войнами, военными и вооруженными конфликтами, контртеррористическими операциями<sup>1</sup>, которые имеют начало, ограничены во времени и завершаются постконфликтным (послевоенным) урегулированием. В то время как пограничные системы непрерывно реализуют меры по охране границы (преимущественно процессная деятельность).

Второе свойство – *характер действий*. Военные, специальные и пограничные системы реализуют меры (ведут действия) преимущественно с применением вооружения и военной техники, что, во-первых, не исключает применения сил и средств невоенного характера [88], во-вторых, позволяет разграничить указанные системы и, например, системы таможенных, природоохранных, экономических, экологических и иных мер [263].

*Организация систем обеспечения безопасности (военных, специальных и пограничных систем)* – это совокупность процессов (действий), направленных

<sup>1</sup> Контртеррористическая операция – комплекс специальных, оперативно-боевых, войсковых и иных мероприятий с применением боевой техники, оружия и специальных средств по пресечению террористического акта, обезвреживанию террористов, обеспечению безопасности физических лиц, организаций и учреждений, а также по минимизации последствий террористического акта [265].

ных на создание и совершенствование системы мер и деятельности в интересах защиты национальных интересов страны, а также результат этих процессов (уровень или состояние защищенности). *Управление* системами обеспечения безопасности – это воздействия на управляемые системы (уже организованные) с целью обеспечения их требуемого поведения.

Взаимосвязь управления и организации в общем виде показана на рис. 1.3.2 [45].

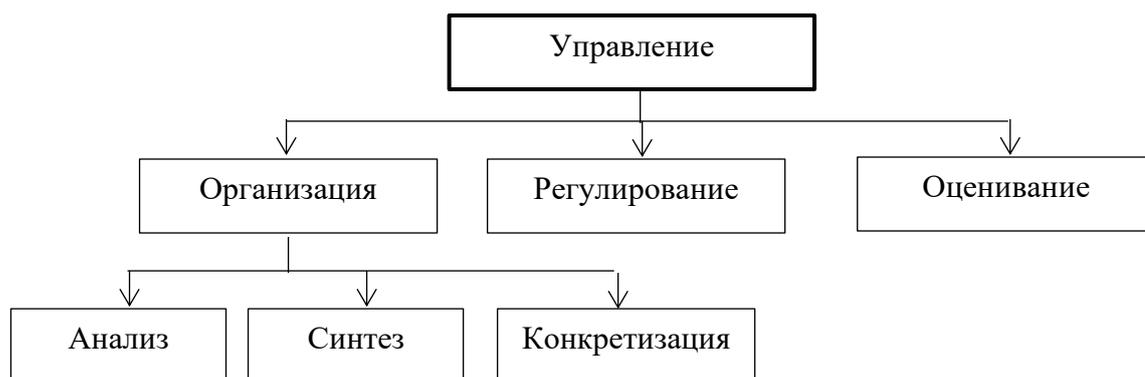


Рис. 1.3.2. Структура управления

Одним из элементов организации (и механизмом управления) является *координация* (от лат. *co* – совместно и *ordinatio* – упорядочение), взаимосвязь, согласование, приведение в соответствие» [60, с. 627]. Под координацией понимается «согласование, приведение в соответствие (функций, действий и т. д.); деятельность, направленная на согласование поведения двух или нескольких субъектов для достижения нек-рой цели. ... Согласование осуществляют: органы управления; сами участники управляемого процесса. Первый способ представляет собой одну из управленч. функций. Принятое решение оформляется в виде графика, сетевого графика, целевой программы и т. д. Сами участники координируют свои действия в процессе переговоров, совещаний, переписки. Его рез-т оформляется в виде соглашения (договора, протокола).

Для успешности координированного взаимодействия необходимо соблюдение следующих принципов: участники должны быть заинтересованы в достижении общей цели; они должны быть убеждены в том, что от них зависит успех проводимой работы; каждый из них должен неукоснительно следовать согласованной программе; должна быть предусмотрена система контроля за поведением участников и санкции за допущенные ими нарушения; программа должна оставлять возможность для ее коррекции при изменившихся обстоятельствах» [312, с. 232].

В годы Великой Отечественной войны для координации боевых действий фронтов был учрежден институт представителей Ставки Верховного Главного Командования.

На тактическом, оперативном и оперативно-стратегическом уровне

чаще используют термин «*взаимодействие*» (как одну из функций управления): «взаимообусловленные (согласованные) совместные действия подразделений, воинских частей, соединений и объединений видов, родов войск ВС, других войск, воинских формирований и органов, элементов боевого порядка (оперативного построения) и различных видов оружия по целям, задачам (объектам), месту, направлениям, рубежам (районам), времени и способам выполнения поставленных задач в интересах общевойсковых подразделений, воинских частей, соединений и объединений для достижения успешных действий группировок, целей операции или войны в целом»<sup>1</sup>.

В тактическом звене взаимодействие организуется по этапам выполнения полученной задачи, направлениям действий, рубежам и времени. В результате организации взаимодействия командир должен добиться единого понимания командирами штатных и приданных подразделений (огневых средств) полученной задачи и способов её выполнения, знания всем личным составом сигналов оповещения, взаимодействия, управления и порядка действий по ним [268].

Исходя из анализа текста Основ государственной пограничной политики можно сделать вывод, что координация является основой взаимодействия: «обеспечение координации деятельности субъектов государственной пограничной политики при ее реализации осуществляется Государственной пограничной комиссией», «в целях взаимодействия территориальных органов федеральных органов исполнительной власти, органов государственной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления при реализации ими государственной пограничной политики в федеральных округах по инициативе Государственной пограничной комиссии могут создаваться пограничные комиссии» [275].

По мнению А. С. Плиевой «целью координации является создание соответствующего режима отношений между субъектами, при котором выполнение ими согласованных задач достигается с наименьшими расходами сил, средств и времени. Целью же взаимодействия является осуществление определенных согласованных действий, направленных на достижение конкретного результата» [292, с. 36].

Координация действий с субъектами других государств выполняется в форме *сотрудничества*.

---

<sup>1</sup> Взаимодействие. – URL: <https://dictionary.mil.ru/folder/123102/item/129190/> (дата обращения – 20.02.2024).

Прежде, чем перейти к обсуждению структуры современной военной кибернетики, сформулируем ее основные области приложений (рис. 1.3.3).

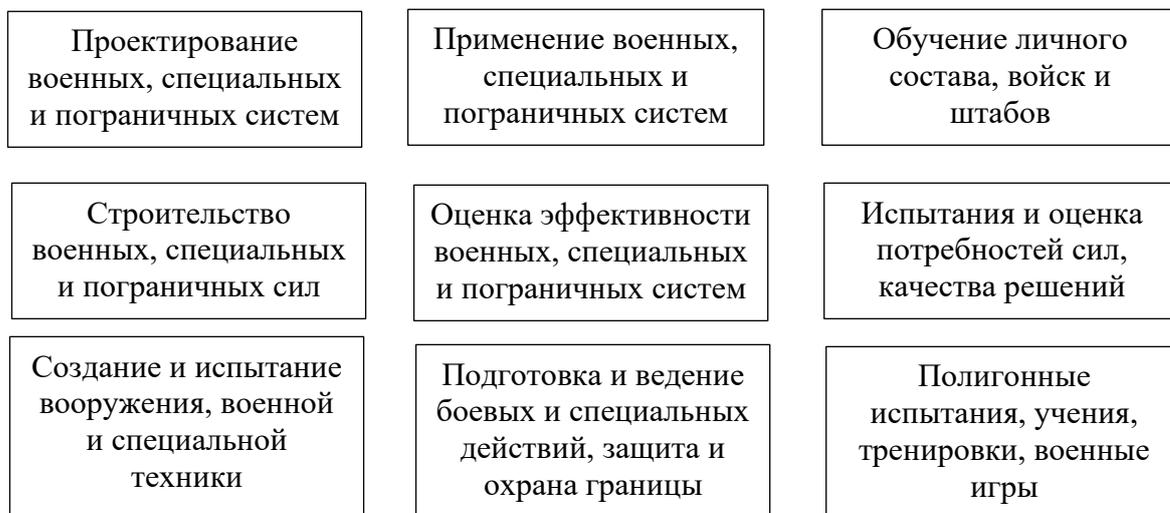


Рис. 1.3.3. Области приложений военной кибернетики 2.0

Поскольку военная кибернетика является отраслью кибернетики, то она находит в ней концептуальные и методологические основы, методы и подходы (например, системный подход). Состав и структура военной кибернетики 2.0 представлены на рис. 1.3.4.



Рис. 1.3.4. Состав и структура военной кибернетики 2.0

Показанные на рисунке элементы вместе с тем являются основой для проведения исследований и разработок, а также для организации межсистемных связей (военная кибернетика как система систем).

На базовом уровне расположены:

- 1) теория военных систем (и элемент теории – системы подготовки и ведения боевых и специальных действий, охраны границы);
- 2) военная статистика<sup>1</sup> (см. [87]);
- 3) модели военных, боевых и специальных действий, охраны границы.

Пунктиром показано, что теория военных систем находится в стадии становления, это одно из перспективных направлений исследований в области военной кибернетики.

Моделям военных, боевых и специальных действий, охраны границы посвящена настоящая монография.

Военная статистика как учебная дисциплина в России известна с 1832 г. (кафедра военной географии и статистики Императорской Военной академии) [235]. Значительный вклад в развитие военной статистики внесли Д. А. Милютин [231], Н. Н. Обручев (под его редакцией в 1868 г. начался выпуск «Военно-статистического сборника»), Я. А. Гребенщиков [118], М. Н. Тухачевский (см. главу «Статистика в гражданской войне» в [344, т. 1]), А. Е. Снесарев (им военная статистика сведена к статистике вооруженных сил [321]). Основные показатели развития страны в предвоенные годы, во время Великой Отечественной войны и в восстановительный период, полученные с применением расчетных статистических методов представлены в сборнике [77]. В настоящее время статистические методы широко используются при оценке обороноспособности и военной мощи государств [567], расчете индексов глобальной мощи (см., например, индекс Global Firepower<sup>2</sup> учитывает свыше 60-ти факторов, характеризующих возможности стран мира по ведению войны на суше, в море и воздухе обычными средствами). Со сборником задач по военной и оборонной статистике можно ознакомиться на сайте<sup>3</sup>.

Трем указанным на рисунке элементам (базовым дисциплинам) можно поставить в соответствие этапы разработки базовых моделей: 1) формализация; 2) решение задачи моделирования; 3) анализ модели на реальных или опытных данных, проверка адекватности результатов моделирования. Конечно, взаимосвязи между элементами базового уровня гораздо сложнее. В част-

<sup>1</sup> Пограничная статистика может рассматриваться как элемент международной, социальной и военной статистики (см. [109]).

<sup>2</sup> Global Firepower 2024. – URL: <https://www.globalfirepower.com/> (дата обращения – 02.06.2024).

<sup>3</sup> Military And Defense Statistics. – URL: <https://gitnux.org/topics/statistics/military-and-defense-statistics/> (дата обращения – 02.06.2024).

ности, данные военной статистики используются для оценки различных параметров моделей, а при необходимости в военной статистике разрабатываются новые методы, исследования и испытания в интересах моделирования.

Результатом исследований на базовом уровне являются так называемые *теоретические методы и модели*, предназначенные для использования в научной и образовательной деятельности, а также в качестве основы для разработки прикладных моделей и специального математического обеспечения автоматизированных систем управления войсками (силами) и оружием.

Уровень прикладных дисциплин включает:

- 1) прикладные модели военных, боевых и специальных действий, охраны границы;
- 2) военную системотехнику (системную инженерию);
- 3) информационные и организационные технологии военного управления.

Исследования и разработки на этих уровнях должны дать ответ на вопросы: 1) какой функционал требуется реализовать? 2) как его реализовать в системах управления войсками и оружием? 3) как применять созданные системы?

Содержание прикладных дисциплин рассматривается в специальной литературе. Далее рассмотрим функции моделирования и классификацию методов и моделей военных, боевых и специальных действий.

### ***1.3.2. Классификация моделей военных, боевых и специальных действий***

В методологии научного исследования выделяют следующие *функции моделирования* [248, с. 198-199]:

- дескриптивная функция;
- прогностическая функция;
- нормативная функция.

*Дескриптивная функция* заключается в том, что модели (за счет абстрагирования) позволяют достаточно просто объяснить наблюдаемые явления и процессы (другими словами, они дают ответ на вопрос «почему мир устроен так»). Успешные в этом отношении модели становятся компонентами научных теорий и являются эффективным средством отражения содержания последних (поэтому познавательную функцию моделирования можно рассматривать как составляющую дескриптивной функции).

*Прогностическая функция* моделирования отражает его возможность предсказывать будущие свойства и состояния моделируемых систем, то есть

отвечать на вопрос «что будет?»).

*Нормативная функция* моделирования заключается в получении ответа на вопрос «как должно быть?» – если, помимо состояния системы, заданы критерии оценки ее состояния, то за счет использования оптимизации возможно не только описать существующую систему, но и построить ее нормативный образ – желательный с точки зрения субъекта, интересы и предпочтения которого отражены используемыми критериями.

Можно выделить четыре общих класса математических моделей военных, боевых и специальных действий [253] (основание классификации – функции моделирования):

- описательные модели;
- имитационные модели;
- оптимизационные модели;
- модели принятия решений.

Каждый из этих классов (возможны и другие основания классификации – см., например, [182; 575]) включает значительное число подклассов, различающихся используемым математическим аппаратом – см. рис. 1.3.5.

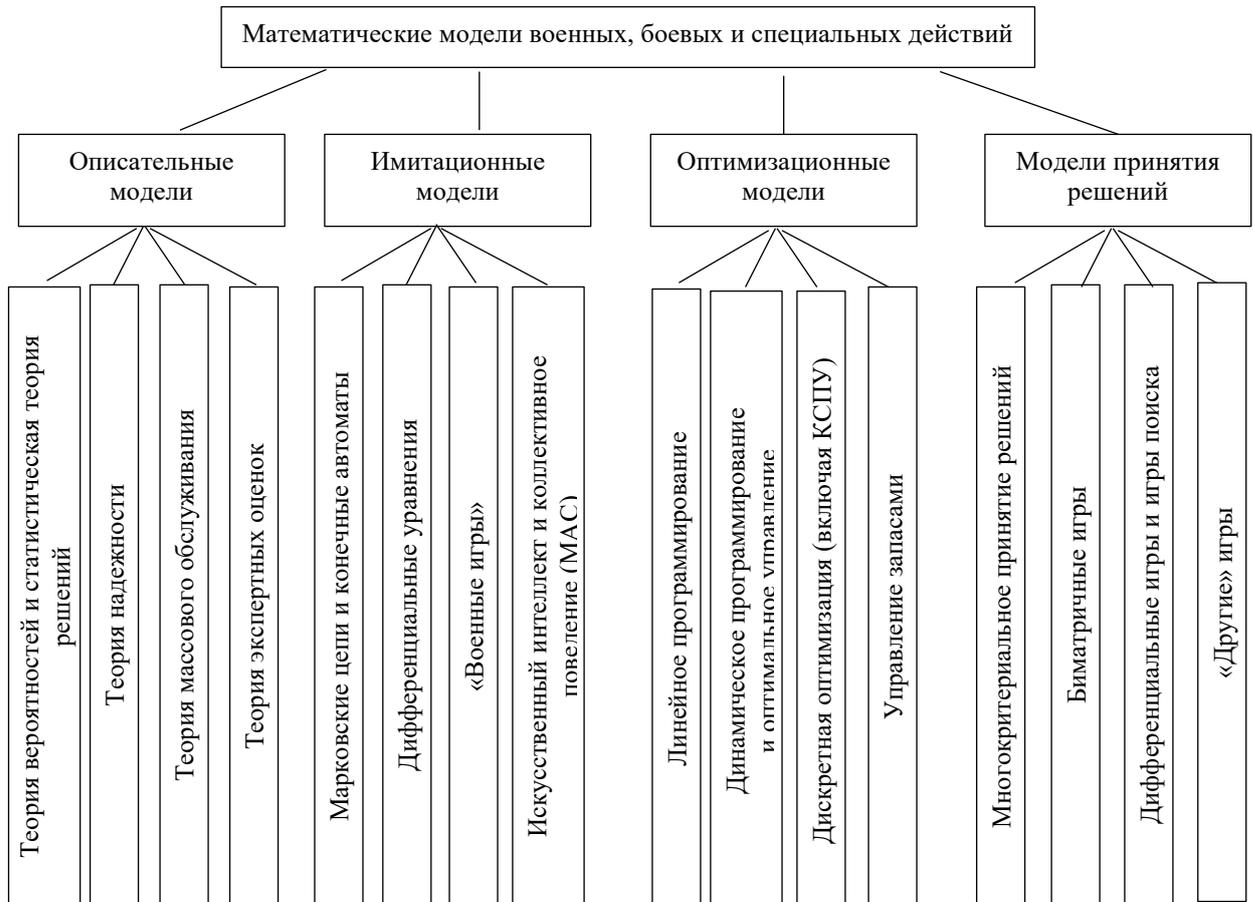


Рис. 1.3.5. Классификация математических моделей военных, боевых и специальных действий

Так, *описательные модели* основываются на методах теории вероятностей и статистической теории решений (принятие решений в условиях «природной» неопределенности) [306; 332], теории надежности и теории массового обслуживания [78; 339; 371], теории экспертных оценок [332]. К описательным моделям можно отнести и качественный анализ соответствующих динамических систем, исследование их структурной устойчивости [18; 26].

*Имитационные модели* военных действий основываются на аппарате марковских цепей, дифференциальных уравнений, конечных автоматов или методах распределенного искусственного интеллекта (так называемые мультиагентные системы – МАС), методах сценарного и когнитивного моделирования.

Наиболее известными и получившими широкое развитие являются модели Осипова-Ланчестера (см. также главы 4 и 7), использующие аппарат дифференциальных уравнений для описания динамики численности сил участников военных конфликтов и специальных действий.

Значительное место занимают так называемые *военные игры* (деловые, имитационные), основывающиеся на тех или иных математических моделях [105; 196; 225]. На сегодняшний день создаются и эксплуатируются многочисленные компьютерные системы (включая среды имитационного моделирования и специальные языки – например, AnyLogic, Battle Management Language и т. п.) и имитационные модели (включая элементы систем поддержки принятия решений (СППР)) по управлению военными действиями – в авиации [68; 271; 281], на флоте [67; 92].

*Сценарные модели* и методы являются развитием математического аппарата когнитивных карт. Сценарный подход [378; 379] позволяет осуществлять моделирование и анализ не поддающихся строгой формализации проблем, для решения которых применение точных методов крайне затруднено в силу неполноты, недостаточной достоверности и запаздывания поступающей исходной информации, а также необходимости обработки разнородных по своей природе количественных и качественных исходных данных, субъективных суждений и выводов экспертов и т. д.

*Оптимизационные модели* используют аппарат линейного и динамического программирования [78; 332; 371], теории оптимального управления [78; 339; 371], дискретной оптимизации (включая теорию графов и методы календарно-сетового планирования и управления (КСПУ) применительно к планированию боевых действий и управлению войсками [320; 332; 371]) и отчасти теории массового обслуживания и теории управления запасами [78; 332; 339; 371].

Принято считать, что *модели принятия решений* условно разделяются на

модели индивидуального и коллективного принятия решений. В первых основной акцент обычно делается на многокритериальное принятие решений [78], во вторых моделях – на использование теории игр<sup>1</sup> (принятие решений в условиях игровой неопределенности). Концепции решения игр изложены в работах [73; 124; 165]. Теоретико-игровые модели военных, боевых и специальных действий более подробно рассматриваются ниже, начиная с четвертой главы.

Другим возможным основанием классификации моделей боевых действий являются их области применения (сферы, домены) – на суше (четвертая глава), на море (пятая глава), в воздухе (шестая глава) и космосе, в киберпространстве, а также модели специальных действий (седьмая глава) и охраны границы (восьмая глава).

В настоящее время сформировался «золотой фонд» работ в области моделирования военных, боевых и специальных действий (критерии отбора работ – их актуальность и востребованность, развитие заложенных идей в работах современных авторов), см. табл. 1.3.1.

*Таблица 1.3.1. «Золотой фонд» работ в области моделирования военных, боевых и специальных действий*

| № | Авторы, название работ, год издания   | Примечание  |
|---|---|---|
| 1 | Осипов М. П. «Влияние численности сражающихся сторон на их потери», 1915. Lanchester F. «Aircraft in Warfare: the Dawn of the Fourth Arm», 1916   | Первые модели динамики боевых действий, активно развиваются и в настоящее время, применяются в системах поддержки принятия решений  |
| 2 | Триандафиллов В.К. «Характер операций современных армий», 1929  | Один из основоположников системного подхода и анализа. На основе анализа тенденций развития вооружения армий стран Европы выполнил оперативно-тактические расчеты и разработал новый раздел военной науки – оперативное искусство |
| 3 | Колмогоров А. Н. «Число попаданий при нескольких выстрелах и общие принципы оценки эффективности системы стрельбы», «Искусственное рассеивание в случае поражения одним попаданием и рассеивания в одном измерении», 1945 | Один из основоположников современной теории вероятностей, теории массового обслуживания (уравнения Колмогорова, см. [169]) теории стрельбы и управления огнем   |
| 4 | Морз Ф. М., Кимбелл Дж. Е. «Методы исследования операций» (Methods of Operations Research), 1956  | Одна из первых открытых работ по применению некоторых методов исследования операций для решения военных задач   |

<sup>1</sup> Теория игр – раздел математики, изучающий математические модели принятия решений в конфликтных ситуациях. Под конфликтной ситуацией, или просто конфликтом, понимается ситуация, в которой участвуют различные стороны (называемые игроками), имеющие несовпадающие интересы [58].

| №  | Авторы, название работ, год издания  | Примечание  |
|----|--|---|
| 5  | Беллман Р.Э. «Динамическое программирование», 1960<br>Беллман Р.Э., Дрейфус С. «Прикладные задачи динамического программирования», 1965                            | Описаны задачи распределения ресурсов и запасов, составления расписаний, оптимальных траекторий, марковские процессы, многошаговые игры, метод динамического программирования   |
| 6  | Айзекс Р. «Дифференциальные игры», 1967  | Один из создателей теории дифференциальных игр. Эти игры стали развиваться с конца 1950-х гг. независимо в СССР (Л.С. Понтрягин, Л.А. Петросян, Н.Н. Красовский и др. как обобщение теории управления) и США                                    |
| 7  | Понтрягин Л.С. и др. «Математическая теория оптимальных процессов», 1961<br>«К теории дифференциальных игр», 1966  | Создатель теории оптимального управления (в основе которой лежит принцип максимума Понтрягина), имеет значимые результаты по дифференциальным играм   |
| 8  | Саати Т. Л. «Математические методы исследования операций», 1963  | Описаны приемы создания и исследования математических моделей целенаправленных процессов на базе методов линейного и квадратичного программирования, теории игр, теории вероятностей, математической статистики и теории массового обслуживания |
| 9  | Вентцель Е. С. «Введение в исследование операций», 1964<br>Вентцель Е. С. «Исследование операций», 1972<br>Чуев Ю. В. «Исследование операций в военном деле», 1970 | Хрестоматийные работы по описанию методов исследования операций и их применению для решения военных задач   |
| 10 | Лефевр В. А. «Элементы логики рефлексивных игр», 1966, «Конфликтующие структуры», 1967   | Основоположник теории рефлексивных игр и рефлексивного управления   |
| 11 | Гермейер Ю. Б. «Введение в теорию исследования операций», 1971   | Описание принципов исследования операций, развитие приложений теории игр для решения военных задач  |
| 12 | Дуров В. Р. «Боевое применение и боевая эффективность истребителей-перехватчиков», 1972  | Изложены задачи оценки и повышения боевой эффективности истребителей-перехватчиков с применением методов исследования операций  |

Указанные в настоящем подразделе направления будут в дальнейшем подробно раскрыты, здесь же, с методической точки зрения, целесообразно кратко рассмотреть классические и современные подходы к принятию решений в условиях неопределенности (важнейшей и имманентной характеристике боевых и специальных действий, охраны границы).

### 1.3.3. Принятие решений в условиях неопределенности

Классик военной науки К. фон Клаузевиц в труде «О войне» выделил три стороны (тенденции, законы) войны: она «представляет удивительную троицу, составленную из насилия, как первоначального своего элемента, ненависти и вражды, которые следует рассматривать, как *слепой природный инстинкт*; из игры вероятностей и случая, обращающих ее в арену *свободной духовной деятельности*; из подчиненности ее в качестве орудия политики, благодаря которому она подчиняется *чистому рассудку*» [167, с. 58].

Теория управления и военная кибернетика выработали подходы к принятию решений как в условиях полной определенности (так называемые детерминированные задачи управления), так и в условиях неопределенности (uncertainty). Более того, такие категории теории систем, как сложность (complexity) и эмерджентность (emergency) «операционно проявляются через неопределенность (в т.ч. свойств и поведения систем)» [45, с. 68]. Неопределенность обычно разделяется на измеримую и истинную.

*Измеримая неопределенность* определяется «как возможность наступления описываемых некоторыми закономерностями событий (которые могут наступить, а могут и не наступить). Для анализа таких событий могут быть использованы количественные методы (например, вероятностные/статистические), основанные на предыдущих измерениях или фундаментальных законах (вместе с предположением о неизменности условий и закономерностей)» [45, с. 66].

*Истинной неопределенностью* называется возможность наступления уникальных (или редко повторяющихся) событий. «Принципиальным отличием истинной неопределенности от измеримой является то, что события первой из них возникают вследствие непознанных факторов (частый и важный, но частный случай – активный выбор индивида), в то время как события второй, хотя и непредсказуемы, описываются известными закономерностями» [45, с. 66].

С измеримой неопределенностью тесно связано понятие *риска*, под которым понимается сочетание (с точки зрения вычисления – произведение) вероятности и последствий наступления неблагоприятных событий.

Неопределенность также классифицируется по следующим основаниям:

- инструмент описания (вероятностная, интервальная, нечеткая);
- источник (природная, игровая, иного рода).

Пусть субъект способен выбрать действие  $y$  из множества  $A$  допустимых действий ( $y \in A$ ), например, распределение сил и средств по задачам

и направлениям. В результате выбора действия под влиянием обстановки (противника, внешней среды и т. д.) реализуется результат деятельности, который обозначим  $z \in A_0$ , где  $A_0$  – множество допустимых результатов деятельности (например, выполнение ближайшей задачи). В условиях неопределенности обычно непросто/невозможно построить однозначную зависимость между действием и его результатом.

Считается, что субъект обладает *предпочтениями* на множестве результатов, т. е. имеет возможность сравнивать различные результаты деятельности по некоторому закону изменения результата деятельности в зависимости от действия и обстановки. Выбор субъектом действия называется *правилом индивидуального рационального выбора*, которое выделяет множество действий, наиболее предпочтительных для субъекта.

Правило индивидуального рационального выбора определяется через гипотезы [257]:

1) *гипотеза рационального поведения*, заключающаяся в том, что субъект с учетом всей имеющейся у него информации выбирает действия, которые приводят к наиболее предпочтительным результатам деятельности;

2) *гипотеза детерминизма* (решение на бой, операцию всегда определено и конкретно), заключающаяся в том, что субъект стремится устранить (с учетом всей имеющейся у него информации) существующую неопределенность и принимать решения в условиях полной информированности (другими словами, окончательный критерий, которым руководствуется лицо, принимающее решения (ЛПР), не должен содержать неопределенных параметров).

Процесс перехода от предпочтений на множестве  $A_0$  результатов к индуцированным предпочтениям<sup>1</sup> на множестве  $A$  действий, называется *устранением неопределенности*. В случае, когда предпочтения субъекта исходно описываются *функцией полезности*, его индуцированные предпочтения будут описываться *целевой функцией*, которая каждому действию субъекта ставит в соответствие некоторое действительное число (которое может интерпретироваться как его «выигрыш» от выбора этого действия) [257, с. 67].

Рассмотрим одного субъекта, интересы которого отражены его вещественной *целевой функцией* (или *функцией полезности*)  $f(\theta, u)$ , определенной на декартовом произведении множества  $A$  возможных действий  $u$  и множества  $\Omega$  возможных обстановок  $\theta$  его деятельности:  $u \in A, \theta \in \Omega: \Omega \times A \rightarrow \mathbb{R}^1$ . Тогда

---

<sup>1</sup> Термин «индуцированные предпочтения» обусловлен тем, что предпочтения на множестве действий порождаются (индуцируются) предпочтениями на множестве результатов деятельности и законом взаимосвязи между действиями и результатами.

множеством рационального выбора будет множество действий, доставляющих максимум целевой функции:

$$y^* = \text{Arg max}_{y \in A} f(\theta, y). \quad (1.3.1)$$

Решение  $y^*$  называется **оптимальным** при обстановке  $\theta$ . Экстремизационный принцип (1.3.1) принятия решений существенно детерминистичный (не учитывающий, например, возможную неопределенность обстановки), т. е. предполагает, что обстановка на момент принятия решения субъекту известна<sup>1</sup>.

Если субъектов несколько (например, мы и противник), то возникает *игровая неопределенность* – для описания коллективного поведения субъектов недостаточно определить их предпочтения и правила индивидуального рационального выбора. Каждый субъект осуществляет выбор действия  $y_i$ , принадлежащего множеству  $A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  – множество субъектов. Выигрыш  $i$ -го субъекта зависит от его собственного действия, от обстановки игры – вектора действий оппонентов и от состояния внешней среды и описывается функцией выигрыша  $f_i(\theta, y)$ , где  $y = (y_i, y_{-i}) = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  – вектор действий всех субъектов, называемый ситуацией игры. Решением игры (*равновесием*) называется множество устойчивых в том или ином (и оговариваемом в каждом конкретном случае) смысле векторов действий субъектов. Принцип принятия  $i$ -м субъектом решения о выбираемом действии (при фиксированных обстановке и состоянии природы) можно записать так (BR обозначает наилучший ответ – Best Response, см. приложение 2):

$$BR_i(\theta, y_{-i}) = \text{Arg max}_{y_i \in A_i} f_i(\theta, y_i, y_{-i}), \quad i = 1, \dots, n. \quad (1.3.2)$$

Принципы принятия решений (1.3.1)-(1.3.2) соответствуют так называемой классической рациональности (full rationality). Г. Саймоном предложено использовать *модели ограниченной рациональности* (bounded rationality), то есть отказаться от предположения о стремлении субъекта к достижению абсолютного максимума функции полезности, заменив его предположением о стремлении к достижению определенного уровня полезности, быть может, зависящего от величины оптимума. *Ограниченная рациональность имеет место, когда у субъекта нет знаний, времени, возможности или желания искать оптимальное решение.*

Психологами развита концепция адаптивного набора инструментов, в соответствии с которой в сознании каждого человека хранится модульный

---

<sup>1</sup> Если на момент принятия решения субъекту известно только распределение вероятностей на множестве возможных обстановок, то в задаче (1.3.1) максимизируется математическое ожидание функции полезности.

набор эвристик, и субъект не пытается оптимизировать свое решение, а встретившись с новой ситуацией, применяет ту или иную эвристику, выбирая приемлемое решение.

Частными случаями ограниченной рациональности могут рассматриваться:

- использование эвристик и типовых решений;
- стратегическая рефлексия, в рамках которых субъекты используют конечные ранги рефлексии, считая, что и ранги рефлексии оппонентов также ограничены (см. [260]);
- равновесие дискретного отклика и другие социофизические модели, в рамках которых выбор субъекта стохастичен, но приводящие к большему выигрышу действия выбираются чаще.

На сегодняшний день существуют десятки моделей ограниченной рациональности, использующие разнообразный математический аппарат. Особенно велико разнообразие способов учета возможной неопределенности (как правило, об обстановке).

Модели принятия решений (индивидуальных и коллективных) используются далее (главы 2-8) при рассмотрении и решении конкретных задач.

Таким образом, анализ развития кибернетики и комплементарных с ней научных дисциплин позволил уточнить предмет и структуру современной военной кибернетики, выделить в ней уровень *базовых дисциплин*: 1) теория военных систем, 2) военная статистика, 3) модели военных, боевых и специальных действий, охраны границы. Третья базовая дисциплина будет рассмотрена далее.

#### **1.4. Ограничения на ведение военных действий в праве вооруженных конфликтов (международном гуманитарном праве)**

При организации военной деятельности, при моделировании военных и непосредственно боевых действий необходимо учитывать различные условия их проведения и влияющие на них факторы, в том числе международно-правового характера, определяемые нормами отрасли международного права – *права вооруженных конфликтов*. Данная отрасль представляет собой совокупность норм международного права, регулирующих отношения между государствами, международными межправительственными организациями,

иными субъектами международного права в период начала, ведения, окончания вооруженных конфликтов.

Данную отрасль международного права довольно часто называют *международным гуманитарным правом*, т.к. значительная часть ее норм предусматривает гуманитарные вопросы ведения вооруженных конфликтов. В Наставлении по международному гуманитарному праву для Вооруженных Сил Российской Федерации, утвержденном министром обороны Российской Федерации 8 августа 2001 г. (далее – Наставление по МГП), подчеркнута, что цель международного гуманитарного права – облегчить, насколько возможно, бедствия и лишения, приносимые боевыми действиями. Международное гуманитарное право при любых обстоятельствах обеспечивает гуманное обращение во время вооруженных конфликтов лицам, непосредственно не принимающим участия в боевых действиях, включая тех лиц, которые перестали принимать в них участие вследствие болезни, ранения, задержания или по любой другой причине, без дискриминации по причинам расы, цвета кожи, вероисповедания, происхождения, имущественного положения или других подобных критериев. В данном документе отмечается, что его положения надлежит использовать сообразуясь с обстановкой, решительно добиваясь безусловного выполнения боевых задач при соблюдении норм международного гуманитарного права. Командир и штаб при организации и в ходе ведения боевых действий должны учитывать его нормы<sup>1</sup>.

Вместе с тем, следует заметить, что такие институты международного права как институты начала и окончания войны, право нейтралитета и ряд других выходят за рамки гуманитарных вопросов и посвящены значительной части вопросов международно-правового регулирования межгосударственных отношений в период вооруженных конфликтов. Кроме того, право вооруженных конфликтов тесно связано и с другими отраслями и институтами международного права, в частности, международным морским, дипломатическим, правоохранительным (уголовным) правом, правом международных договоров и другими областями международного права.

Как и в любой отрасли международного права в праве вооруженных конфликтов имеются свои источники. К их числу можно отнести многочисленные международные обычаи, международные договоры. Международные обычаи, признаваемые Российской Федерацией, и ее международные договоры в области права вооруженных конфликтов, являются для нашего

---

<sup>1</sup> См. Наставление по МГП <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=309311#q59tALUqczSY4H1>

государства обязательными<sup>1</sup>. Важное значение для регулирования межгосударственных отношений в данной области можно отнести и общие принципы международного права. К таким принципам, например, можно отнести принцип Ф. Мартенса<sup>2</sup>, принцип ограничения воюющих в выборе средств ведения войны и др.

Ранее право вооруженных конфликтов рассматривалось прежде всего как совокупность обычных норм международного права. Но в настоящее время такие нормы претерпели существенное изменение и нашли отражение в универсальных международных договорах, в которых нашли закрепление и

---

<sup>1</sup> Гаагские конвенции от 18 октября 1907 г. (об открытии военных действий; о законах и обычаях сухопутной войны с приложением: положение о законах и обычаях сухопутной войны; о положении неприятельских торговых судов при начале военных действий; об обращении торговых судов в суда военные; о бомбардировании морскими силами во время войны; о правах и обязанностях нейтральных держав и лиц в случае сухопутной войны; о правах и обязанностях нейтральных держав в случае морской войны); Протокол о запрещении применения на войне удушливых, ядовитых и других подобных газов и бактериологических средств (Женева, 17 июня 1925 г.); Правила действия подводных лодок по отношению к торговым судам в военное время (Лондон, 1936 г.); Женевские конвенции о защите жертв войны от 12 августа 1949 г. (об улучшении участи раненых и больных в действующих армиях; об улучшении участи раненых, больных и лиц, потерпевших кораблекрушение, из состава вооруженных сил на море; об обращении с военнопленными; о защите гражданского населения во время войны); Дополнительный протокол к Женевским конвенциям от 12 августа 1949 г., касающийся защиты жертв международных вооруженных конфликтов (Протокол I), от 8 июня 1977 г.; Дополнительный протокол к Женевским конвенциям от 12 августа 1949 г., касающийся защиты жертв военных конфликтов немеждународного характера (Протокол II), от 8 июня 1977 г.; Конвенция о защите культурных ценностей в случае вооруженного конфликта (Гаага, 14 мая 1954 г.); Конвенция о запрещении разработки, производства и накопления запасов бактериологического биологического) и токсинного оружия и об их уничтожении от 10 апреля 1972 г.; Конвенция о запрещении военного или любого иного враждебного использования средств воздействия на природную среду от 10 декабря 1976 г.; Конвенция о запрещении или ограничении применения конкретных видов обычного оружия, которые могут считаться наносящими чрезмерные повреждения или имеющими неизбирательное действие, от 10 октября 1980 г. и протоколы к ней (о необнаруживаемых осколках (Протокол I); о запрещении или ограничении применения мин, мин-ловушек и других устройств (Протокол II) с поправками, внесенными 3 мая 1996 г.; о запрещении или ограничении применения зажигательного оружия (Протокол III); об ослепляющем лазерном оружии (Протокол IV) от 13 октября 1995 г.; Конвенция о запрещении разработки, производства, накопления и применения химического оружия и о его уничтожении от 13 января 1993 г.

<sup>2</sup> Согласно Гаагской конвенции о законах и обычаях сухопутной войны 1907 г. «Впредь до того времени, когда представится возможность издать более полный свод законов войны, Высокие Договаривающиеся Стороны считают уместным засвидетельствовать, что в случаях, не предусмотренных принятыми ими постановлениями, население и воюющие остаются под охраною и действием начал международного права, поскольку они вытекают из установившихся между образованными народами обычаев, из законов человечности и требований общественного сознания».

новые нормы международного права, отражающие современные реалии ведения вооруженных конфликтов.

Международное право регулирует деятельность государств по ведению вооруженных конфликтов, но одновременно накладывает и определенные ограничения на их осуществление, которые следует учитывать при осуществлении и/или моделировании военных (боевых) действий. К такого рода **ограничениям** следует отнести:

- запрет войны и иных неправомерных вооруженных конфликтов;
- запрещение определенных средств и методов их ведения;
- установление пространственных и временных пределов вооруженных конфликтов;
- недопустимость ведения боевых действий в отношении определенных лиц и объектов, находящихся под защитой международного права.

Характер вооруженного конфликта и территориальная сфера его осуществления определяет вид вооруженного конфликта: вооруженные конфликты международного характера и вооруженные конфликты немеждународного характера. При этом, большая часть норм международного права посвящена вооруженным конфликтам международного характера.

Под *вооруженным конфликтом международного характера* понимается применение силы одним государством<sup>1</sup> против суверенитета, территориальной неприкосновенности или политической независимости любого другого государства. Наставление по МГП определяет международный вооруженный конфликт как открытое столкновение между вооруженными силами двух или более государств вне зависимости от их масштаба, интенсивности и территориального охвата.

Современное международное право и Устав ООН накладывает самое главное ограничение на вооруженные конфликты международного характера – оно запрещает войну, агрессию как явление. Вместе с тем оно допускает и подтверждает правомерность войны как самообороны. Государство, против которого применена вооруженная сила, имеет неотъемлемое право применить ответную силу – индивидуальную самооборону – в соответствии с международным обычаем и Уставом ООН. Другие государства, в рамках договоров о коллективной взаимопомощи с государствами, подвергшимися нападению, имеют право применить вооруженную силу против агрессора. Совет Безопасности ООН также имеет право на принятие решения о применении вооруженной силы в соответствии с Уставом ООН в отношении

---

<sup>1</sup> Под государством может пониматься и группа государств.

государства-агрессора с целью прекращения вооруженного нападения на какое-либо государство.

Наряду с международными обычаями, которые нередко называются *законами и обычаями ведения войны*, к основным источникам международного права, содержащие нормы, посвященные такого рода вооруженных конфликтов, выделяют Гаагские конвенции 1899 и 1907 гг. об открытии военных действий, о законах и обычаях сухопутной войны, четыре Женевские конвенции 1949 г. о защите жертв войны (об улучшении участи раненых и больных в действующих армиях; об улучшении участи раненых, больных и лиц, потерпевших кораблекрушение, из состава вооруженных сил на море; об обращении с военнопленными; о защите гражданского населения во время войны) и Дополнительный протокол к Женевским конвенциям от 12 августа 1949 г., касающийся защиты жертв международных вооруженных конфликтов (Протокол I), от 8 июня 1977 г., другие многочисленные международные договоры.

Если международные обычаи, как и общие принципы права являются обязательными для всех государств, то нормы международных договоров являются обязательными только для его участников. Следует учитывать, что состав участников международных договоров в области ведения тех или иных вооруженных конфликтов различен.

Не всякий вооруженный конфликт можно отнести к вооруженному конфликту международного характера, который как правило сопровождается систематическими военными действиями, планируемыми заранее другим государством. К таким вооруженным конфликтам не относятся единичные *вооруженные инциденты*, связанные с использованием вооруженной силы и техники (например, обстрел через границу и другие вооруженные пограничные инциденты на границе, несанкционированное попадание ракеты во время учений в иностранные суда и летательные аппараты и т. п.). Вместе с тем и такие инциденты могут привести к широкомасштабным вооруженным действиям и вооруженному конфликту международного характера.

Вооруженное нападение одного государства против другого может иметь различные формы. Генеральная Ассамблея ООН в своей резолюции «Определение агрессии» от 14 декабря 1974 г. дала общее определение *агрессии*, под которой понимается применение вооруженной силы государством против суверенитета, территориальной неприкосновенности или политической независимости другого государства или каким-либо другим образом, несовместимым с Уставом ООН, как это установлено в настоящем определении. Также данная резолюция содержит вытекающие из общего определения *виды агрессивных действий*. К их числу, независимо от объяв-

ления войны, отнесены: вторжение или нападение вооруженных сил государства на территорию другого государства или любая военная оккупация, какой бы временный характер она ни носила, являющаяся результатом такого вторжения или нападения, или любая аннексия с применением силы территории другого государства или части ее; бомбардировка вооруженными силами государства территории другого государства или применение любого оружия государством против территории другого государства; блокада портов или берегов государства вооруженными силами другого государства; нападение вооруженными силами государства на сухопутные, морские или воздушные силы или морские и воздушные флоты другого государства; применение вооруженных сил одного государства, находящихся на территории другого государства по соглашению с принимающим государством, в нарушение условий, предусмотренных в соглашении, или любое продолжение их пребывания на такой территории по прекращении действия соглашения; действие государства, позволяющего, чтобы его территория, которую оно предоставило в распоряжение другого государства, использовалась этим другим государством для совершения акта агрессии против третьего государства; засылка государством или от имени государства вооруженных банд, групп и регулярных сил или наемников, которые осуществляют акты применения вооруженной силы против другого государства, носящие столь серьезный характер, что это равносильно перечисленным выше актам, или его значительное участие в них. Данный перечень не является исчерпывающим и Совет Безопасности может определить, что другие акты представляют собой агрессию согласно положениям Устава ООН.

В традиционном формате международного права, нашедшем отражение в его нормах, применение вооруженной силы должно, как правило, влечь за собой наступление состояния войны между воюющими государствами, даже без его объявления. Начало войны наступает с момента фактического открытия военных действий или с момента, когда война формально объявлена. Вместе с тем все же фактические действия государств по применению вооруженной силы определяют пространственные и временные пределы международного вооруженного конфликта.

Следует отметить, что состояние войны не всегда сопровождает военные действия. Согласно статье 2 Женевской конвенции от 12 августа 1949 г. об обращении с военнопленными настоящая Конвенция будет применяться в случае объявленной войны или всякого другого вооруженного конфликта, возникающего между двумя или несколькими Высокими Договаривающимися Сторонами, даже в том случае, если одна из них не признает состояния войны.

После Второй Мировой войны произошло более 200 международных вооруженных конфликтов, но при этом крайне затруднительно привести примеры официального объявления войны воюющими государствами [190, с. 219]. Несмотря на это, между воюющими государствами в любом случае возникают правоотношения, характерные для вооруженного конфликта. Правоотношения также возникают и между воюющими и невоюющими государствами, нейтральными государствами, в том числе и с рядом международных межправительственных организаций (ООН, ОДКБ, НАТО и др.).

Говоря о вооруженных конфликтах, когда они характеризуются как война, в соответствии с Конвенцией об открытии военных действий (Гаага, 18 октября 1907 года) военные действия между участниками не должны начинаться без предварительного и недвусмысленного предупреждения. Оно должно иметь или форму мотивированного объявления войны, или форму ультиматума с условным объявлением войны. Вместе с тем это положение не нивелирует преступность агрессивной войны. Если сторона не выполняет указанное требование, то это также как и начало агрессивной войны – международное преступление<sup>1</sup>.

При моделировании военных действий следует учитывать, что они ведутся в пределах определенных пространств – территории двух или нескольких государств. В международном праве различают понятия «театр войны» и «театр военных действий». При этом, под *театром войны* понимается сухопутная, морская и воздушная территория воюющих сторон, на которых они потенциально могут вести военные действия. В театр войны может входить несколько театров военных действий. В свою очередь *театр военных действий* – это территория, на которой воюющие стороны ведут боевые действия [227, с. 274]. При этом международное право уточняет ряд ограничений на ведение военных действий в отношении отдельных территорий или даже государств.

Так, в театр военных действий согласно международному праву не могут быть превращены: нейтрализованные согласно международным договорам территории государств и иных пространств; территории нейтральных и других невоюющих государств; центры сосредоточения культурных ценностей; территории, где сосредоточены одни лишь мирные объекты, к которым, в частности относят жилые районы городов, предприятия, дошкольные, школьные и другие учебные заведения.

---

<sup>1</sup> Германия напала на Советский Союз в 1941 г. без уведомления о начале войны. Такое уведомление было сделано немецкой стороной позже, уже в ходе боевых действий.

Заметим, что *нейтральным* признается государство, которое само не участвует в войне и не оказывает никакой помощи воюющим государствам. При этом нейтралитет государства может быть: постоянным<sup>1</sup> и временным (эвентуальным), который относится только к определенной войне, о чем государство делает специальное заявление. Нейтралитет может быть закреплен в международном договоре между государствами.

Территория нейтрального государства включает в себя нейтральную территорию и нейтральные воды (территориальное море и внутренние (морские) воды). Довольно часто в средствах массовой информации воды открытого моря, т. е., международные воды, именуют нейтральными, что, согласно международному праву, является некорректным утверждением.

*Театр войны на море* может включать в себя не только внутренние и территориальные воды воюющих сторон, но и открытое море, воздушное пространство над ними. При этом, согласно международному праву, участники войны не должны препятствовать свободе судоходства нейтральных и других невоюющих государств. Они не должны создавать какие-либо специальные оборонительные, закрытые для торгового мореплавания, полетов и т. п. зоны. Вместе с тем, воюющие стороны к этому нередко прибегали<sup>2</sup>.

В отношениях между государствами, находящимися в состоянии войны, возникают определенные предусмотренные международным правом ограничения, в частности, это:

– разрыв дипломатических и консульских отношений между государствами [226, с. 534];

– прекращение действия международных договоров, рассчитанных на мирное время. Участие воюющих государств в договорах приостанавливается. Вступают в силу международные договоры и международные обычаи, действующие только в период войны, в том числе договоры о коллективной самообороне, о правах и обязанностях нейтральных государств и т. д.;

– может быть конфискована вся государственная собственность неприятельского государства, находящаяся на территории другой воюющей стороны. Это не относится к имуществу дипломатических представительств и консульских учреждений;

<sup>1</sup> В настоящее время статусом постоянного нейтралитета обладают Швейцария (1813 г.), Австрия (1955 г.), Мальта (1981 г.), Туркменистан (1995 г.).

<sup>2</sup> Например, установление США в апреле 1965 г. во время войны во Вьетнаме 100-мильной зоны (района боевых действий) вокруг всего побережья Вьетнама.

– запрещаются сделки с юридическими и физическими лицами неприятеля, сворачиваются все экономические и иные отношения, существующие в мирное время;

– неприятельские торговые суда, которые вследствие чрезвычайных обстоятельств, не смогли выйти из неприятельского порта в течение достаточно льготного срока, или которым выход не был разрешен, не могут быть конфискованы. Однако воюющий может их только задержать с обязательством возратить после войны без вознаграждения, или подвергнуть судно реквизиции за вознаграждение. Это относится и к грузам, находящимся на этих судах. Судно может быть снабжено и пропускным свидетельством для выхода из порта неприятельской стороны в свой порт или иной указанный противником порт<sup>1</sup>;

– в отношении граждан неприятельского государства может быть установлен специальный режим вплоть до интернирования и принудительного поселения в специально отведенных местах<sup>2</sup> и др.

Следует учитывать, что прекращение военных действий не означает прекращение состояния войны. Прекращению состояния войны предшествует прекращение военных действий.

Считается, что *формами прекращения военных действий* могут быть перемирие и капитуляция. При этом *перемирие* – это приостановление или прекращение военных действий между воюющими сторонами. Оно может быть местным и общим. Под местным перемирием понимается временное приостановление военных действий между отдельными частями вооруженных сил на конкретном участке театра военных действий. Оно может осуществляться для подбора раненых, погребения погибших, направления парламентариев, эвакуации гражданского населения и т. д. Данное перемирие может быть заключено местным командованием [227, с. 280].

Общее перемирие прекращает военные действия на всем театре войны. Решение о нем принимается верховным военным командованием. Например, ООН в своей практике, в лице ее Совета Безопасности ООН, в 1949 году приняла решение, в соответствии с которым были заключены соглашения о перемирии между Израилем и Египтом, Сирией, Ливаном, Иорданией.

В свою очередь *капитуляция* – это прекращение военных действий, в результате которого прекращают борьбу и сдаются отдельные гарнизоны,

---

<sup>1</sup> См. Конвенция о положении неприятельских торговых судов при начале военных действий (Гаага, 18 октября 1907 г.).

<sup>2</sup> См. Женевская конвенция о защите гражданского населения во время войны (Женева, 12 августа 1949 г.).

окруженные группировки или все вооруженные одного государства или их определенная часть на театрах военных действий. Капитуляция может быть общей и частной. Общая капитуляция означает признание себя побежденным именно со стороны государства. В отличие от частной капитуляции она влечет определенные правовые последствия. На проигравшее войну государство при общей капитуляции могут быть возложены определенные политические и военные обязательства. К ее разновидностям относят безоговорочную капитуляцию, которая предусматривает собой полное поражение вооруженных сил воюющего государства и сдачу войск в плен без каких-либо условий. Капитуляция может быть частной, осуществляемой на отдельном участке военных действий.

Для юридического прекращения состояния войны воюющие государства используют различные формы. Так, общепризнанной формой прекращения состояния войны является заключение между такими государствами *мирного договора*. В нем обычно закрепляются прекращение состояния войны, восстановление в полном объеме мирных отношений, консульских и дипломатических отношений. Кроме того, мирные договоры могут охватывать следующий круг вопросов: ответственность военных преступников; территориальные вопросы; возмещение возникшего в ходе войны ущерба; восстановление прежних международных договоров; вопросы возвращения военнопленных; вывод оккупационных войск; послевоенная деятельность отдельных политических организаций и другие вопросы.

Возникают правовые последствия и в отношении третьих государств – нейтральных и невоюющих. Прекращают действовать нормы международного права о нейтралитете, о коллективной взаимопомощи и др.

Нередко государства прибегают к практике принятия односторонних и двусторонних актов, когда заключение мирного договора откладывается на неопределенный срок или его заключение невозможно ввиду отсутствия руководства стороны, проигравшей войну<sup>1</sup>.

В случае *вооруженных конфликтов немеждународного характера* военные действия ведутся в пределах территории одного государства, когда его вооруженным силам противостоят антиправительственные вооруженные

---

<sup>1</sup> Индия, Египет и Пакистан в январе 1951 г. прибегли к односторонним актам, прекращающим состояние войны с Германией. Таким же образом поступил Советский Союз, прекратив состояние войны с Германией на основании Указа Президиума Верховного Совета СССР от 25 января 1955 г. В Указе было объявлено, что состояние войны между Советским Союзом и Германией прекращается, и между ними устанавливаются мирные отношения. 19 октября 1956 г. СССР и Япония подписали совместную декларацию о прекращении состояния войны. В частности, в Декларации указано о восстановлении дипломатических и консульских отношений.

формирования или когда на территории государства вооруженные действия осуществляют не подконтрольные правительству организованные вооруженные группы.

Вооруженные конфликты немеждународного характера регулируются положениями Дополнительного протокола к Женевским конвенциям от 12 августа 1949 г., касающегося защиты жертв военных конфликтов немеждународного характера (Протокол II), от 8 июня 1977 г. (далее – Протокол II к Женевским конвенциям 1949 г.). Начало и окончание вооруженного конфликта определяется временным интервалом фактических военных действий.

Считается, что таким вооруженным конфликтам характерны определенный уровень организованности антиправительственных и иных неподконтрольных правительству вооруженных подразделений, которые должны иметь ответственное командование. Важно ведение непрерывных и согласованных, реальных боевых действий между противоборствующими сторонами, а также контроль со стороны антиправительственных и иных неподконтрольных правительству сторон определенной части государственной территории. Случаи нарушения внутреннего порядка в государстве, возникновения обстановки внутренней напряженности, такими как беспорядки, отдельные и спорадические акты насилия и иные акты аналогичного характера, не могут считаться вооруженными конфликтами немеждународного характера. Согласно Протоколу II к Женевским конвенциям 1949 г. ничто в настоящем договоре не должно истолковываться как затрагивающее суверенитет государства или обязанность правительства всеми законными средствами поддерживать или восстанавливать правопорядок в государстве или защищать национальное единство и территориальную целостность государства. Также ничто в данном Протоколе не должно истолковываться как оправдание прямого или косвенного вмешательства по какой бы то ни было причине в вооруженный конфликт или во внутренние или внешние дела государства, на территории которой происходит этот конфликт.

В случае любого вооруженного конфликта воюющие стороны ограничены в выборе *средств или методов ведения боевых действий* (войны). В целом, международным правом запрещается применять оружие, снаряды, вещества и методы ведения боевых действий, способные причинить излишние повреждения или излишние страдания. Запрещается применять методы или средства ведения боевых действий, которые имеют своей целью причинить или, как можно ожидать, причинят обширный, долговременный и серьезный ущерб природной среде.

Запрещенные средства ведения боевых действий представляют собой запрещенные международным правом оружие и специальная техника,

используемые вооруженными силами для уничтожения живой силы и материальных средств противника, а также подавления и ослабления его сил и способности к сопротивлению [227, с. 278].

Перечень запрещенных средств ведения боевых действий содержится в многочисленных международных договорах и документах. В частности, Декларацией об отмене употребления взрывчатых и зажигательных пуль (Санкт-Петербург, 29 ноября (11 декабря) 1868 года запрещено использование снарядов, которые при весе менее 400 граммов имеют свойство взрываться или снаряжены ударным или горючим составом. Декларацией о неупотреблении легко разворачивающихся и сплюсчивающихся пуль (Гаага 1899 года) запрещены пули «дум-дум». Приложением к IV Гаагской конвенции 1907 года запрещены яд и отравленное оружие. Женевским протоколом о запрещении применения на войне удушающих, ядовитых или других подобных газов и бактериологических средств 1925 года, Конвенцией о запрещении разработки, производства и накопления запасов бактериологического (биологического) и токсичного оружия и об их уничтожении 1972 года и Конвенцией о запрещении разработки, производства, накопления и применения химического оружия и о его уничтожении 1993 года – химическое и бактериологическое оружие массового поражения.

Международными договорами установлены и иные запреты отдельных видов оружия. При этом важно, как указывалось выше, для определения правомерности их использования учитывать состав участников этих договоров, который может быть различным.

В свою очередь, под *запрещенными методами ведения боевых действий* следует понимать совокупность запрещенных международным правом приемов, способов использования средств ведения боевых действий для достижения конкретных целей [227, с. 278]. Так, в соответствии с Дополнительным протоколом к Женевским конвенциям от 12 августа 1949 г., касающимся защиты жертв международных вооруженных конфликтов (Протокол I), от 8 июня 1977 г. запрещается убивать, наносить ранения или брать в плен противника, прибегая к вероломству. При этом под *вероломством* понимаются действия, направленные на то, чтобы вызвать доверие противника и заставить его поверить, что он имеет право на защиту или обязан предоставить такую защиту согласно нормам международного права, применяемого в период вооруженных конфликтов, с целью обмана такого доверия. В частности, к вероломству относится симулирование: намерения вести переговоры под флагом перемирия или симулирования капитуляции; выхода из строя вследствие ранений или болезни; использования статуса гражданского лица или некомбатанта. Запрещается использовать не по

назначению отличительную эмблему красного креста, красного полумесяца, красного льва и солнца или красной рамки в форме стоящего на одной из своих вершин квадрата на белом фоне или другие эмблемы. Также запрещается преднамеренно злоупотреблять во время вооруженного конфликта другими международно-признанными защитными эмблемами, знаками или сигналами, включая защитную эмблему культурных ценностей. Запрещается использовать отличительную эмблему ООН, кроме как с ее разрешения. Недопустимо использование в вооруженном конфликте флагов, военных эмблем, воинских знаков различия или форменной одежды воюющих, а также нейтральных государств или других государств, не являющихся сторонами, находящимися в конфликте.

К запрещенным методам ведения боевых действий международным правом причисляется отдача приказа не оставлять никого в живых, угрожать этим противнику или вести военные действия на такой основе.

Запрещается подвергать нападению лицо, которое признано или которое в данных обстоятельствах следует признать *лицом, вышедшим из строя*. Вышедшим из строя считается любое лицо, если оно: находится во власти противной стороны; ясно выражает намерение сдаться в плен; или находится без сознания или каким-либо другим образом выведено из строя вследствие ранения или болезни и поэтому не способно защищаться, при условии, что в любом таком случае это лицо воздерживается от каких-либо враждебных действий и не пытается совершить побег.

К незаконным методам ведения боевых действий также относится бомбардировка незащищенных городов, селений, жилищ или строений, уничтожение или разрушение памятников культуры, храмов, госпиталей. Запрещается подвергать нападению, вывозить или приводить в негодность объекты, необходимые для выживания гражданского населения: посевы, скот, запасы питьевой воды и т. д. [227, с. 280].

Международными договорами предусмотрены и иные методы ведения войны, многие из которых стали обычными нормами международного права. В УК РФ применение запрещенных средств и методов ведения войны является уголовно наказуемым деянием<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Статья 356 (Применение запрещенных средств и методов ведения войны). Жестокое обращение с военнопленными или гражданским населением, депортация гражданского населения, разграбление национального имущества на оккупированной территории, применение в вооруженном конфликте средств и методов, запрещенных международным договором Российской Федерации; применение оружия массового поражения, запрещенного международным договором Российской Федерации.

Вместе с тем международным правом не запрещаются *военные хитрости*. Они направлены на то, чтобы ввести противника в заблуждение или побудить его действовать опрометчиво. К их числу, например, относится использование маскировки, ловушек, ложных операций и дезинформация, другие, предусмотренные боевыми уставами, действия по обману противника, не нарушающие норм международного права.

Международным правом установлены ограничения в отношении определенной категории лиц, участвующих в вооруженном конфликте или оказавшиеся в пределах театра военных действий.

Так, под защитой международного права находится гражданское население, и воюющие стороны должны обеспечить его защиту. Запрещается использовать гражданское население в качестве прикрытия от нападения неприятеля. В отношении гражданских лиц недопустимы коллективные наказания, меры запугивания, террора, ограбления, взятие заложников и репрессии. Под особой защитой международного права находятся женщины и дети. Особенно сложной задачей при ведении военных действий является выявление в районе нахождения неприятеля гражданского населения.

Сами участники вооруженного конфликта в соответствии с международным правом неоднородны по своему составу и в отношении них действуют различные правовые ограничения при осуществлении военного насилия.

Согласно международному праву, лица, входящие в состав вооруженных сил, находящихся в конфликте государств, подразделяются на комбатантов и некомбатантов.

К *комбатантам* относятся лица, входящие в состав вооруженных сил воюющих сторон и имеющие право принимать участие в военных действиях. Они непосредственно ведут боевые действия против неприятеля с оружием в руках. Только в отношении них применимо военное насилие, вплоть до физического уничтожения [227, с. 276]. Вместе с тем, попав в руки неприятеля, комбатанты в ходе вооруженных конфликтов международного характера становятся *военнопленными*<sup>1</sup>. В соответствии с международным правом

---

<sup>1</sup> Кроме того, к военнопленным относятся захваченные противником: личный состав ополчений и добровольческих отрядов, включая личный состав организованных движений сопротивления, принадлежащих стороне, находящейся в конфликте; лица, которые на законных основаниях следуют за вооруженными силами, но не входят в их состав (гражданские члены экипажей военных воздушных судов, военные корреспонденты, члены рабочих команд и служб, обслуживающих вооруженные силы) и имеют удостоверения личности установленного образца; население неоккупированной территории, которое при приближении противника стихийно по собственному почину берется за оружие для борьбы с вторгающимися войсками, не успев сформироваться в регулярные войска, если оно

военнопленные находятся во власти государства, а не отдельных лиц или военных формирований, взявших их в плен. Плен является не наказанием, а временным ограничением возможности участвовать в боевых действиях<sup>1</sup>. Следует заметить, что в ходе вооруженных конфликтов немеждународного характера лица, захваченные неприятелем, не становятся военнопленными, не являются комбатантами, а режим военного плена, предусмотренный Протоколу II к Женевским конвенциям 1949 г., не действует. Такие лица именуется «лицами, свобода которых ограничена в связи с вооруженным конфликтом». Вместе с тем, как и в ходе вооруженного конфликта международного характера, в отношении указанных лиц международным правом устанавливаются гарантии гуманного обращения.

К комбатантам относятся личный состав регулярных вооруженных сил (сухопутных, воздушных, военно-морских и т. д.), экипажи торговых морских судов и гражданских самолетов воюющих сторон, переоборудованные в военные, личный состав вооруженных сил ООН. К указанной категории также относятся иррегулярные силы – партизаны, личный состав ополчений, добровольческих отрядов, при условии если они: имеют во главе лицо, ответственное за своих подчиненных; имеют определенный, явственно видный издали отличительный знак; соблюдают в своих действиях законы и обычаи войны; открыто носят оружие во время каждого военного столкновения и во время нахождения на виду у противника (в том числе с помощью оптических приборов) в ходе развертывания в боевые порядки [227, с. 276].

В свою очередь, к *некомбатантам* относятся лица, входящие в состав вооруженных сил, находящихся в конфликте сторон, функции которых сводятся лишь к обслуживанию и обеспечению боевой деятельности вооруженных сил, в частности, медицинский и интендантский состав, военные юристы, корреспонденты, репортеры, духовные лица. К указанной категории лиц не должно применяться оружие. Если они сами его применяют, то только для самообороны. При непосредственном участии некомбатантов в боевых действиях они становятся комбатантами. В случае, если эти лица захватываются неприятельской стороной, то они становятся военнопленными [227, с. 278]. Медицинский персонал, при необходимости, должен быть отпущен для ухода за ранеными и больными.

---

открыто носит оружие и соблюдает нормы международного гуманитарного права. См., приказ Минобороны России от 8 августа 2001 г.

<sup>1</sup> См.: Конвенция о законах и обычаях сухопутной войны (Гаага, 18 октября 1907 г.); Наставление по МГП.

Среди комбатантов имеются лица, имеющие особый правовой статус. К их числу можно отнести парламентаров и лиц их сопровождающих, добровольцев и разведчиков.

*Парламентаром* считается лицо, уполномоченное одной из воюющих сторон вступить в переговоры с другою. Парламентар должен иметь белый флаг. Как сам парламентар, так и сопровождающие его лица пользуются неприкосновенностью. Начальник войск, к которому послан парламентар, не обязан принять его при всяких обстоятельствах. Он может принять все необходимые меры, дабы воспрепятствовать парламентару воспользоваться возложенным на него поручением для собирания сведений. Он имеет право в случае злоупотреблений со стороны парламентара временно его задержать<sup>1</sup>. В то же время, если неприятельская сторона неправомерно нарушает неприкосновенность парламентара, то это расценивается как военное преступление<sup>2</sup>.

Если лицо добровольно поступает в действующую армию одной из воюющих сторон, то оно считается *добровольцем*. Критерием отнесения данного лица к числу добровольцев является то, что он поступает на службу руководствуясь не материальной выгодой и благами, а как правило, по идейным соображениям. Он входит в состав вооруженных сил государства, на стороне которого сражается, т. е. является комбатантом. В случае захвата неприятелем доброволец становится военнопленным.

Иной правовой статус имеют *наемники*, которые не имеют права претендовать на статус комбатанта или военнопленного<sup>3</sup>. Они подлежат уголовному наказанию в соответствии с национальным законодательством<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> См.: Конвенция о законах и обычаях сухопутной войны (Гаага, 18 октября 1907 г.).

<sup>2</sup> Там же.

<sup>3</sup> См.: Дополнительный протокол к Женевским конвенциям от 12 августа 1949 г., касающийся защиты жертв международных вооруженных конфликтов (Протокол I) от 8 июня 1977 г.

<sup>4</sup> В соответствии со статьей 359 (*Наемничество*) УК РФ под наемничеством понимается: вербовка, обучение, финансирование или иное материальное обеспечение наемника, а равно его использование в вооруженном конфликте или военных действиях; те же деяния, совершенные лицом с использованием своего служебного положения или в отношении несовершеннолетнего; участие наемника в вооруженном конфликте или военных действиях. В примечании к статье указано, что наемником признается лицо, действующее в целях получения материального вознаграждения и не являющееся гражданином государства, участвующего в вооруженном конфликте или военных действиях, не проживающее постоянно на его территории, а также не являющееся лицом, направленным для исполнения официальных обязанностей.

В условиях войны нередко возникает вопрос о разграничении понятий военного разведчика и лазутчика (шпиона)<sup>1</sup>. Так, *военный разведчик* – это лицо, входящее в состав вооруженных сил воюющих сторон, т. е., является комбатантом и которое в форме своей армии проникает для собирания сведений в районе действий неприятельской армии или на территории, контролируемой противником. Захваченный неприятелем военный разведчик является комбатантом и имеет право претендовать на статус военнопленного.

Антиподом военному разведчику является лазутчик (*шпион*). Это лицо, которое, действуя тайно и под ложными предлогами, собирает или старается собрать сведения о вооруженных силах противника в районе действий одного из воюющих с намерением сообщить таковые противной стороне<sup>2</sup>. Лазутчик, не является комбатантом и в случае захвата противником подлежит ответственности в соответствии с его законодательством, обычно уголовным.

Право вооруженных конфликтов накладывает определенные ограничения при ведении боевых действий в отношении так называемых *жертв войны*, к числу которых относятся: раненые, больные и военнопленные, лица, потерпевшим кораблекрушение<sup>3</sup>, а также рассмотренное ранее гражданское население. Нормы права вооруженных конфликтов направлены на обеспечение защиты личности, недопущения нарушения ее прав.

Если территория противника захвачена, то неприятельская сторона должна установить и соблюдать правовой режим *военной оккупации*, под которым понимается временное занятие в ходе войны вооруженными силами одного государства территории другого государства и возложение обязанностей по управлению конкретной территории на высшие военные инстанции победившей стороны. При этом оккупация должна носить временный характер, и территория после окончания войны освобождается. Нередко судьба оккупированных территорий решается в ходе послевоенного урегулирования.

Согласно международному праву недопустимо принуждение населения оккупированной территории к службе в вооруженных силах оккупанта, в том числе и любая пропаганда добровольного вступления в ее армию. Междуна-

---

<sup>1</sup> См., например, Дополнительный протокол к Женевским конвенциям от 12 августа 1949 г., касающийся защиты жертв международных вооруженных конфликтов (Протокол I) от 8 июня 1977 г.

<sup>2</sup> См.: Конвенция о законах и обычаях сухопутной войны (Гаага, 18 октября 1907 г.).

<sup>3</sup> *Лица потерпевшие кораблекрушение* – военнослужащие, гражданские лица, которые подвергаются опасности на море или в других водах в результате катастрофы, случившейся с ними, либо с перевозившим их морским или воздушным судном, и которые воздерживаются от любых враждебных действий. См. Наставление по МГП.

родное право запрещает угон, депортацию населения оккупированной территории, однако допускает полную или частичную его эвакуацию, в случае угрозы безопасности населения и соображений военного характера. Население не может использоваться в качестве живого щита при ведении военных действий. Недопустимо ограбление, конфискация имущества. Воспрещается любое уничтожение оккупирующим государством любого не предназначенного для военных нужд движимого или недвижимого имущества, являющегося собственностью частных лиц, в том числе и оккупированного государства. С целью управления территорией государство, его оккупировавшее, имеет право издавать временные административные и уголовно-правовые акты, если это необходимо для восстановления или обеспечения порядка.

К числу *лиц, находящихся под защитой международного права*, относят жертв вооруженных конфликтов, медицинский и духовный персонал, парламентаров и сопровождающих их лиц, персонал гражданской обороны, персонал, отвечающий за защиту и охрану культурных ценностей, персонал, участвующий в гуманитарных акциях. Нападение на таких лиц запрещается. В случаях, не предусмотренных международными договорами, гражданские лица и комбатанты (воюющие) остаются под защитой и действием принципов международного права, вытекающих из установившихся обычаев, принципов гуманности и требований общественного сознания. В свою очередь, к *объектам, находящимся под защитой международного права*, Наставление по МГП относит медицинские формирования, санитарно-транспортные средства, гражданские объекты, культурные ценности, особо опасные объекты, объекты гражданской обороны, санитарные и безопасные зоны (местности), необороняемые местности и демилитаризованные зоны. Нападение на такие объекты запрещается, за исключением случаев, предусмотренных международным правом.

Наставление по МГП определяет, что управляя воинскими частями (подразделениями) в ходе выполнения поставленной боевой задачи, командир обязан постоянно уточнять, какие объекты находятся под защитой международного гуманитарного права, а какие являются военными объектами и с учетом этого принимать все возможные меры предосторожности при выборе способов и средств нападения, чтобы избежать случайных потерь среди гражданского населения и случайного ущерба гражданским объектам, а если это невозможно, то свести их к минимуму.

Таким образом, при разработке математических моделей необходимо учитывать те ограничения, которые накладывает международное право на ведение вооруженных конфликтов. Важно при этом исходить из международных обязательств конкретных государств, характера боевых

действий, перечня запрещенных международным правом средств и методов ведения вооруженной борьбы, правового статуса как субъектов боевых действий, так и объектов (лиц), в отношении которых они осуществляются, а также территориальных и временных пределов ведения вооруженных конфликтов. При моделировании боевых действий важно учитывать и внутригосударственную нормативную правовую базу, регламентирующую их ведение, требования боевых уставов и наставлений по обеспечению боевых действий при неукоснительном соблюдении норм международного права. Наставление по МГП определяет, что нормы международного права не изменяют установленный боевыми уставами порядок организации боевых действий, однако при принятии решения и планировании боевых действий командирами и штабами должна приниматься во внимание необходимость соблюдения этих норм.

## ГЛАВА 2. МОДЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ И ОБОРОНОСПОСОБНОСТИ

Военная кибернетика имеет своим предметом военную, государственную и пограничную безопасность как элементы национальной безопасности. Значимость этих элементов можно оценить, имея модель безопасности.

В настоящей главе дан обзор моделей безопасности и национальной силы, рассмотрена базовая модель безопасности и ее приложения.

Представленные модели и результаты моделирования вместе с тем могут рассматриваться как элементы верхнего уровня перспективной теории военных систем.

### 2.1. Обзор моделей безопасности и национальной силы

*Безопасность* есть состояние общественных отношений, при котором личность, социальная группа, общность, народ, страна (государство) может самостоятельно, суверенно, без вмешательства и давления извне свободно выбирать и осуществлять свою стратегию международного поведения, духовного, социально-экономического и политического развития [322].

Уставом ООН признаются рядоположенными и важнейшими такие ценности, как «международный мир», «безопасность» и «справедливость»: «Все Члены Организации Объединенных Наций разрешают свои международные споры мирными средствами таким образом, чтобы не подвергать угрозе международный мир и безопасность и справедливость» [351].

В современной России безопасность рассматривается максимально широко. Законом «О безопасности» от 5.03.1992 г. безопасность определялась как «состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства от внутренних и внешних угроз». Наряду с термином «безопасность» используются понятия «национальная безопасность» [327], «индивидуальная безопасность» (см. табл. 2.1.1 [46]).

Таблица 2.1.1. Уровни деятельности и безопасность

| Уровень       | Типовой объект                       | Доминируемая форма активности            | Безопасность                |
|---------------|--------------------------------------|--|-----------------------------|
| Культурный    | Этнос, народ                         | Воспроизводство и развитие деятельности  | Национальная безопасность   |
| Политический  | Государство, институт                | Институционализация деятельности         |                             |
| Экономический | Организация, предприятие             | Коллективная практическая деятельность   |                             |
| Социальный    | Общество                             | Коммуникативная деятельность             |                             |
|               | Группа, коллектив: семья, род, племя | Коллективная практическая деятельность   |                             |
| Психический   | Личность                             | Индивидуальная практическая деятельность | Индивидуальная безопасность |
|               | Индивид                              | Внутренняя деятельность                  |                             |
| Биологический | Организм                             | Жизнедеятельность                        |                             |
| Физический    | Тело                                 | Движение                                 |                             |

Закон РФ «О безопасности», в частности, «определяет основные принципы и содержание деятельности по обеспечению безопасности государства, общественной безопасности, экологической безопасности, безопасности личности, иных видов безопасности, предусмотренных законодательством Российской Федерации (далее – безопасность, национальная безопасность)» [261, статья 1].

Стратегией национальной безопасности Российской Федерации национальная безопасность определялась как состояние защищенности личности, общества и государства от внутренних и внешних угроз, при котором обеспечиваются реализация конституционных прав и свобод граждан, достойные качество и уровень их жизни, суверенитет, независимость, государственная и территориальная целостность, устойчивое социально-экономическое развитие Российской Федерации. Национальная безопасность включает в себя оборону страны и все виды безопасности, прежде всего государственную, общественную, информационную, экологическую, экономическую, транспортную, энергетическую безопасность, безопасность личности [326]. Содержание Стратегии национальной безопасности РФ определяется законом «О стратегическом планировании в Российской Федерации» [266].

В табл. 2.1.2 показано число публикаций на elibrary.ru по ключевому

слову «безопасность» (по состоянию на 18.01.2024).

Из таблицы видно, что большинство публикаций в сфере национальной безопасности относятся к экономической и информационной безопасности.

Таблица 2.1.2. Число публикаций на elibrary.ru по ключевому слову «безопасность»

| Ключевое слово  | Публикаций |
|---|------------|
| безопасность  | 53 506     |
| экономическая безопасность                                      | 51 175     |
| информационная безопасность                                     | 26 910     |
| национальная безопасность                                       | 17 831     |
| продовольственная безопасность                                  | 16 825     |
| экологическая безопасность                                      | 16 801     |
| пожарная безопасность   | 8 523      |
| безопасность жизнедеятельности                                  | 5 492      |
| безопасность дорожного движения                                 | 5 081      |
| финансовая безопасность   | 4 264      |
| промышленная безопасность                                       | 3 715      |
| энергетическая безопасность                                     | 3 310      |
| общественная безопасность                                       | 2 842      |
| психологическая безопасность                                    | 2 824      |
| безопасность движения   | 2 217      |
| безопасность труда  | 2 166      |
| социальная безопасность   | 1 871      |
| международная безопасность                                      | 1 930      |
| транспортная безопасность                                       | 1 680      |
| радиационная безопасность                                       | 1 717      |
| региональная безопасность                                       | 1 471      |
| безопасность полетов  | 1 417      |
| техносферная безопасность                                       | 1 344      |
| кадровая безопасность   | 1 385      |
| экономическая безопасность предприятия                          | 1 314      |
| государственная безопасность                                    | 1 118      |
| личная безопасность   | 1 067      |
| военная безопасность  | 914        |
| экономическая безопасность региона                              | 907        |
| биологическая безопасность                                      | 760        |
| безопасность личности   | 812        |
| методы и системы защиты информации, информационная безопасность | 680        |
| демографическая безопасность                                    | 663        |
| налоговая безопасность  | 728        |
| безопасность государства  | 690        |
| духовная безопасность   | 630        |
| комплексная безопасность  | 636        |

Существуют различные подходы к оценке и анализу безопасности систем того или иного уровня и масштаба.

В. Л. Макаров и др. (ЦЭМИ РАН), используя данные международной статистики, выбрали 28 нормированных показателей, сгруппированных по шести тематическим блокам (ресурсы; экономика и производство; уровень жизни населения; финансовые показатели; вооруженные силы; наука и инновации), и рассчитали текущие и прогнозные ранги стран (табл. 2.1.3) [213; 214].

Таблица 2.1.3. Ранги стран по значению интегрального индекса национальной безопасности

| Страна           | 2020 г. | 2021 г. | 2022 г. | 2023 г. | 2025 г. |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| США              | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       |
| Китай            | 2       | 2       | 2       | 2       | 2       |
| Республика Корея | 3       | 3       | 3       | 3       | 3       |
| Япония           | 4       | 5       | 4       | 4       | 5       |
| Швейцария        | 5       | 4       | 5       | 5       | 4       |
| Германия         | 6       | 6       | 6       | 6       | 6       |
| Франция          | 7       | 7       | 7       | 7       | 7       |
| Люксембург       | 8       | 8       | 9       | 8       | 9       |
| Великобритания   | 9       | 9       | 8       | 9       | 8       |
| Австрия          | 10      | 10      | 10      | 10      | 11      |
| Канада           | 11      | 11      | 11      | 11      | 12      |
| Швеция           | 13      | 13      | 12      | 12      | 10      |
| Россия           | 12      | 12      | 13      | 13      | 15      |
| ОАЭ              | 14      | 14      | 14      | 14      | 13      |
| Израиль          | 15      | 15      | 15      | 15      | 14      |

Важнейшими элементами национальной безопасности являются суверенитет и независимость страны [326]. Очевидно, что суверенитет и независимость Индии выше соответствующих показателей Люксембурга, Франции, Германии и ряда других стран. Но Индия не попала в список лидеров. Одна из содержательных неточностей предложенной методики может заключаться в том, что многие показатели рассчитаны на душу населения. В расчетах не используются такие важнейшие показатели, как численность населения страны и площадь ее территории. Но на мировой арене страны действуют как единое целое (может быть, в союзах с другими странами), а не как усредненные индивиды.

По данным Всемирного банка в 2022 г. Россия вышла на 5-е место в мире по ВВП, обогнав Германию и другие европейские страны, что явно противоречит прогнозным данным, представленным в таблице 2.1.3, и свидетельствует об актуальности исследований в области методов оценки национальной безопасности.

### 2.1.1. Оценки национальной силы

С понятием безопасности страны (национальной безопасности) тесно связаны такие понятия, как «военная безопасность», «национальная мощь», «национальный потенциал», «национальная сила», «комплексная мощь государства» и др.

С 1940-х годов предпринимались многочисленные попытки разработать количественные оценки национальной мощи. Обзоры исследований в этой области представлены, в частности, в работах С. Х. Заргани, В. Л. Макарова, А. Р. Бахтизина, Е. Л. Логинов и др. [214; 585].

В табл. 2.1.4 дана сводная информация о методиках оценки национальной силы [214].

Таблица 2.1.4. Информация о методиках оценки национальной силы

| Количество переменных в методиках | Количество методик с указанным числом переменных |
|-----------------------------------|--|
| 2                                 | 7  |
| 3                                 | 7  |
| 4-5                               | 15   |
| 6-10                              | 13   |
| 11-20                             | 8  |
| 22-100                            | 11   |
| 103-236                           | 4  |

Наиболее часто используемыми факторами национальной силы являются: территория, население, ВВП, промышленное производство, военные расходы, вооруженные силы, затраты на исследования и разработки, объем инвестиций, потребление энергии, производство зерна, производство стали и т. д. В большинстве случаев факторные веса в формулах оценивались экспертами [214].

Дж. Д. Сингер в 1963 г. предложил использовать сводный индекс *CINC* национального потенциала, состоящий из шести компонентов, вычисляемых как значение по стране, деленное на значение по всем странам мира [558]:

$$CINC = \frac{TP + UR + IS + EC + ME + MP}{6}, \quad (2.1.1)$$

где: *TP* – коэффициент численности страны, *UR* – доля городского населения, *IS* – производство чугуна и стали, *EC* – потребление первичной энергии, *ME* – военные расходы, *MP* – численность армии.

По состоянию на 2007 г. рейтинг ведущих стран по *CINC* таков: 1) Китай, 2) США, 3) Индия, 4) Япония, 5) Россия, 6) Бразилия, 7) Германия. Авторами монографии «Баланс сил в ключевых регионах мира: концептуали-

зация и прикладной анализ» сводный индекс рассчитан по состоянию на 2018 г. [32]. В нем Россия занимает третье место.

Используя идею степенной производственной функции (см. третью главу ниже), М. Сулек предложил следующие выражения для расчета геополитической мощи  $P_g$  стран [564]:

$$P_g = \frac{P_e + 2P_m}{3}, \quad (2.1.2)$$

$$P_e = G^\alpha L^\beta A^\gamma, \quad (2.1.3)$$

$$P_m = M^\alpha S^\beta A^\gamma, \quad (2.1.4)$$

где:  $P_e$  – экономическая мощь;  $P_m$  – военная мощь;  $G$  – доля ВВП страны в мировом ВВП;  $L$  – доля численности населения страны от населения Земли;  $A$  – доля площади страны от площади всех стран;  $M$  – доля численности вооруженных сил;  $S$  – доля страны в мировом производстве стали;  $\alpha = 0,65$ ,  $\beta = 0,22$ ,  $\gamma = 0,11$  – параметры степени. Для оценки параметров использовалось утверждение Наполеона: моральный фактор соотносится с физическим как 3 к 1 ( $\alpha / \beta$ ). Значение параметра  $\gamma$  принято в два раза меньше значения  $\beta$ .

По состоянию на 2018 г. распределение стран по геополитической мощи таково: 1) США, 2) Китай, 3) Индия, 4) Россия, 5) Саудовская Аравия, 6) Япония, 7) Бразилия, 8) Франция, 9) Германия, 10) Великобритания.

В качестве методической неточности модели (2.1.2 – 2.1.4) можно указать неверную оценку параметров степени. При значениях факторов (оснований степени), меньших 1, малые значения степени отражают больший вклад.

А.И. Буравлев могущество государства определяет через экономический, военный и политический потенциалы (линейная свертка, коэффициенты значимости назначаются экспертами) [65].

Наряду со статическими моделями национальной мощи известны и динамические модели. В работе «Национальная мощь как сетевой поток» М. Поулшок опирается на следующие аксиомы [535]:

- когда государства сотрудничают, они становятся сильнее;
- в случае конфликта (войны) государства ослабляют друг друга;
- неиспользуемые ресурсы обесцениваются.

Национальная мощь страны оценивается ВВП. Деструктивные действия оценены военными расходами государства, а результаты конфликта – сокращением ВВП и богатства страны (население, территория). В большинстве конфликтов эти издержки несут обе стороны (полностью или частично). Конструктивные действия оцениваются объемом торговли между странами.

Калибровка параметров модели выполнена по данным международной статистики для 193 стран мира за период 1995-2020 гг. (табл. 2.1.5).

Таблица 2.1.5. Оценка параметров модели динамики национальной мощи

| Параметр  | Наименование                    | Значение |
|-----------|---------------------------------|----------|
| $\beta$   | Эффект конструктивного действия | 1,392    |
| $\mu$     | Эффект деструктивного действия  | 30       |
| $\lambda$ | Темпы внутреннего роста         | 1,025    |

Применительно к гражданским войнам и внутренним конфликтам полагается, что потери  $l$  национальной мощи оцениваются военными расходами и ущербом  $x$  от разрушительных действий:

$$l = x + \mu x, \quad \mu = \frac{l - x}{x}. \quad (2.1.5)$$

Для оценки параметров  $\beta$  и  $\lambda$  использовалась модель линейной регрессии:

$$g = 1,025 + 0,201s, \quad (2.1.6)$$

где:  $g$  – годовые темпы роста ВВП,  $s$  – процент международной торговли.

Оценки национальной мощи, которая является одним из элементов безопасности, не учитывают таких параметров безопасности, как устойчивость и сохранность социальных систем и институтов.

### 2.1.2. Институционализм и безопасность

Большая российская энциклопедия дает следующее определение: «*Институционализм*, направление экономической мысли, возникшее в США в начале 20 в. и изучающее совокупность социально-экономических факторов (институтов) во времени, а также исследующее возможности контроля над экономикой со стороны общества. Институционализм активно использует идеи и данные других наук, таких как социология, психология, антропология, для того чтобы содействовать более глубокому анализу институтов и поведения человека» [58]. Основоположником институциональной экономики считается Торстейн Веблен (1857–1929), а фактическим предшественником – Карл Маркс (1818–1883).

Известна идея К. Маркса в форме его закона соответствия производительных сил производственным отношениям. При слишком большом несоответствии одних другим должна происходить революционная замена устаревших отношений (институтов). Современный институционализм рассматривает прежде всего не революционные перестройки институтов, а их реформирование и непрерывное совершенствование.

По Е. Балацкому «любая институциональная система создается либо под уже существующую, либо под проектируемую социальную систему» [35, с. 84]. Социальная система (сущность) включает социальные структуры и связи между ними, материальную базу, культуру, технологии, идеи и мироощущения людей. Она непрерывно эволюционирует, тогда как институты (форма), обеспечивающие стабильность социума и регламентирующие правила поведения, – относительно стабильны. Тогда «для построения эффективной государственной системы необходимо правильное сопряжение институтов и культуры» [35, с. 85].

Изменения в мире (включая геополитическую инверсию – смену мировых лидеров), свидетелями которых мы являемся, могут быть объяснены эрозией институтов в форме падения их качества (эффективности): благодаря феномену экономического роста социальная система постоянно разрастается и усложняется, требуя иного институционального обеспечения [35, с. 85]. Движущей силой изменений на мировой арене являются цивилизации и отдельные государства (после второй мировой войны США способствовали крушению британской колониальной империи), внутри стран – классы (по К. Марксу), этносы (по Л. Н. Гумилеву), социальные группы и т. д.

В условиях геополитической турбулентности и санкционного давления актуальной проблемой является исследование устойчивости государств к внешним ограничениям экономического характера. Е. В. Балацкий и Н. А. Екимова разработали **индекс антихрупкости** национальных экономик («антихрупкость – это способность системы сопротивляться воздействиям извне и в процессе этой борьбы реорганизовывать себя в сторону повышения функциональности по сравнению с изначальным уровнем» [37, с. 32]):

$$J_k = \alpha I_k \sum_{i=1}^m u_i y_i x_{ik}, \quad I_k = \frac{z_k}{\max_k z_k}, \quad (2.1.7)$$

где:  $\alpha$  – калибровочный коэффициент;  $z_k$  – душевой ВВП  $k$ -й страны по паритету покупательной способности;  $x_{ik}$  – доля  $i$ -й отрасли в ВВП  $k$ -й страны;  $u_i$  – повышающий коэффициент значимости  $i$ -й отрасли;  $y_i$  – нормирующий коэффициент;  $m$  – число приоритетных отраслей.

К приоритетным отраслям отнесены:

– аграрный сектор (включая сельское и лесное хозяйство, рыболовство) как базовый элемент экономического суверенитета;

– производство средств производства (орудий труда), обеспечивает необходимый минимум средств труда для последующей производственной деятельности;

- добыча полезных ископаемых (без энергоресурсов, сырья и материалов почти невозможно сопротивляться экономической блокаде);
- фармацевтика.

В табл. 2.1.6 представлены результаты расчета индекса антихрупкости для восьми стран мира [37].

Таблица 2.1.6. Значения индекса антихрупкости для некоторых стран мира

| Страна         | Индекс антихрупкости |         | Тренд,<br>2003 - 2020 | Локальный<br>максимум |
|----------------|----------------------|---------|-----------------------|-----------------------|
|                | 2003 г.              | 2020 г. |                       |                       |
| Россия         | 1,07                 | 1,82    | ↑                     | 2,98                  |
| Швейцария      | 2,07                 | 1,76    | ↓                     | 3,28                  |
| Канада         | 2,48                 | 1,73    | ↓                     | 3,59                  |
| США            | 1,30                 | 0,89    | ↓                     | 2,22                  |
| Германия       | 1,24                 | 1,20    | ↓                     | 2,01                  |
| Бразилия       | 0,92                 | 0,73    | ↓                     | 1,42                  |
| Франция        | 0,89                 | 0,61    | ↓                     | 1,34                  |
| Великобритания | 1,10                 | 0,51    | ↓                     | 1,48                  |

Можно согласиться с мнением авторов методики, что индекс антихрупкости может стать одним из индикаторов системы национальной безопасности на среднесрочный период (до 5-ти лет).

Заслуживает внимания *обобщенный индекс богатства и силы стран* Рэя Далио, представляющий собой усредненное значение частных индексов, характеризующих следующие сферы деятельности: рынок денег; внутренний порядок (внутри страны); внешний порядок (между странами); образование; инновации и технологии; конкуренция (затраты); военная мощь; состояние торговли; производство; финансовый центр; статус резервной валюты; геология и география; система распределения ресурсов; стихийные бедствия; инфраструктура и инвестиции; характер нации; управление и верховенство закона; неравенство доходов, возможностей и ценностей [129].

На рис. 2.1.1 показаны относительное богатство и могущество 11 ведущих империй за последние 500 лет.

Как известно из истории (и это показано на рисунке):

- Китай доминировал на протяжении веков (постоянно опережая Европу в торговле товарами), хотя с 1800-х годов начался резкий спад;
- Нидерланды, относительно небольшая страна, стали одной из великих империй мира в 1600-х годах;
- Великобритания прошла очень похожий путь, достигнув своего пика в 1800-х годах;

– США стали мировой сверхдержавой за последние 150 лет, особенно во время и после Второй мировой войны, и сейчас находятся в относительном упадке, а Китай снова догоняет их.

По Р. Далию, цикл смены мирового лидера (геополитической инверсии) включает следующие этапы:

- новый мировой порядок;
- мир, процветание, рост долга;
- долговой пузырь и разрыв в благосостоянии;
- списание долгов и экономический спад;
- печать денег и кредитов;
- революции и войны;
- долговая и политическая реструктуризация;
- новый мировой порядок.

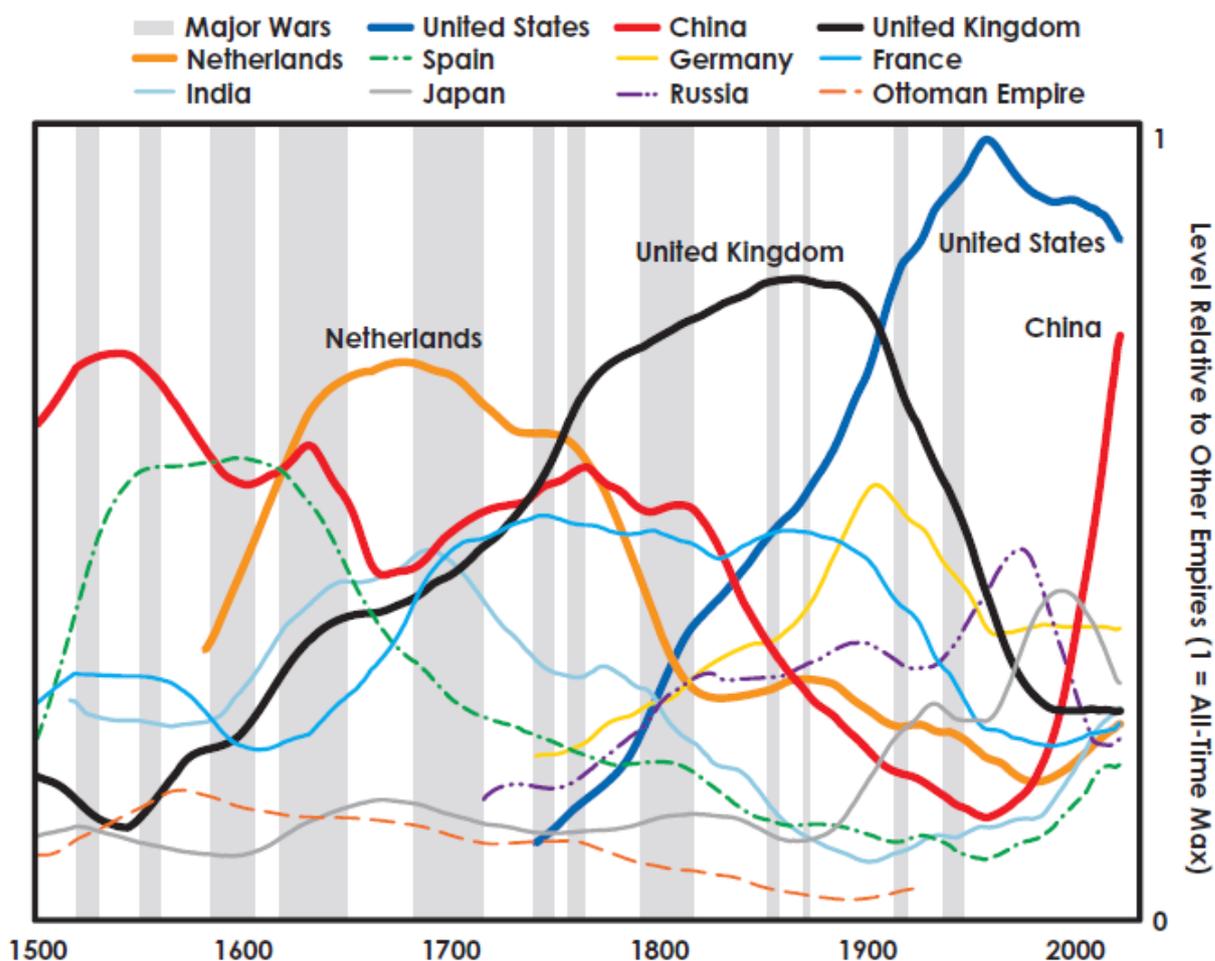


Рис. 2.1.1. Приблизительные оценки относительного положения великих империй<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dalio R. Principles for Dealing with the Changing World Order: Why Nations Succeed and Fail, 2021.

Из рисунка видно, что эпоха четырехсотлетнего доминирования Запада завершается. Важнейшая причина этого доминирования так описывается С. Карагановым: «Условно четыре-пять веков тому назад Европа начала приобретать военное превосходство над другими странами и цивилизациями. До того большая часть мирового ВВП производилась вне европейского субконтинента. Там же – в Китае, в Центральной Азии, арабском мире, на территории нынешней Индии – был главный источник инноваций, научно-технологического прогресса. Порох, как известно, был изобретен в Китае. Пушки тоже, но в их использовании больше преуспели европейцы. Постоянные междоусобные войны на скученном субконтиненте выковали и лучшие военные технологии, и лучшую военную организацию» [163, с. 11].

Работы А. Алесины и Э. Сполаоре в области политической экономики позволили объединить макроэкономику с политикой и социологией [403; 404; 405; 406].

В статье «War, peace, and the size of countries» авторы исходят из следующих предположений. Мир населен дискретным количеством индивидов, которые делятся на однородные популяции (этнические или социальные группы). Каждая из популяций способна контролировать определенную территорию (регион). Конфликты по поводу территорий и границ могут решаться либо мирным (торг и переговоры), либо военным путем. В любом случае результат решающим образом будет зависеть от относительной военной мощи. Страны определяются как независимые политические единицы и состоят из одной или нескольких популяций. Внутри стран: а) оборона находится в ведении правительства; б) доходы и издержки от конфликта с соседними странами распределяются между всеми гражданами страны. Рассматриваются как минимум четыре популяции, две из которых расположены на западе, а две – на востоке (рис. 2.1.2). Периметр окружности равен  $L$ .

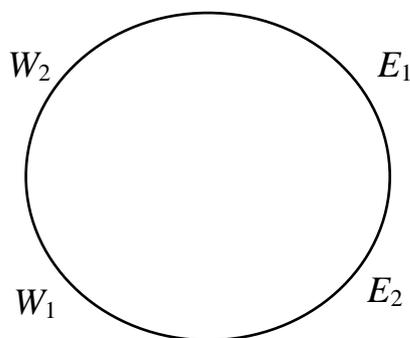


Рис. 2.1.2. Мир Алесины и Сполаоре

Каждой  $i$ -й стране поставлена в соответствие производственная функция:

$$Y_i = A_H H_i + A_L L_i, \quad (2.1.8)$$

где:  $A_H$  и  $A_L$  – параметры;  $H_i$  – численность населения  $i$ -й страны;  $L_i$  – ее территория.

Увеличение населения и территории страны за счет вхождения в нее других популяций увеличивает ее военную мощь, но вместе с тем порождает противоречия, связанные с различными предпочтениями популяций, которые могут привести к внутренним конфликтам или гражданской войне.

Для простоты полагается, что затраты на преодоление разнородностей внутри страны, включающей и западную и восточную части мира (рис. 2.1.2), непомерно велики. Напротив, если популяции  $E_1$  и  $E_2$  объединятся, каждый из индивидов этих стран будет иметь затраты  $G_e \geq 0$ . Аналогично, при объединении популяций  $W_1$  и  $W_2$  затраты будут равны  $G_w \geq 0$ . Без ограничения общности положим  $G_e \geq G_w \geq 0$ . Также полагается, что издержки от неоднородностей одинаковы для всех граждан страны.

Функция полезности индивида в  $i$ -й стране равна:

$$U_i = Y_i - T_i - C_i - \delta_i G_i, \quad (2.1.9)$$

где:  $Y_i$  – доход индивида  $i$ -й страны;  $T_i$  – налоги в  $i$ -й стране;  $C_i$  – издержки индивидов от конфликта;  $\delta_i = 1$ , если индивид живет в  $i$ -й стране, иначе  $\delta_i = 0$ ;  $G_i = G_w$ , если индивид живет в западном регионе, иначе  $G_i = G_e$ .

Далее авторы находят оптимальные размеры стран как результат войны или переговоров.

В модели А. Алесины и Э. Сполаоре все индивиды однородно размещены на отрезке (окружности) и немобильны, что позволило относительно просто найти оптимальное количество стран, максимизирующее суммарную полезность индивидов.

В.М. Маракулин исследовал задачу деления на заданное число стран (сообществ) компактной области в конечномерном пространстве с известной плотностью населения, при котором у жителей отсутствуют стимулы смены юрисдикции [219; 220].

Г. Гроссман и Х. Мендоса исследовали экономическую теорию построения империй, в которой рассматриваются стратегии аннексии (добровольного или принудительного присоединения новых территорий) или завоевания [463].

Таким образом, учение о национальной безопасности охватывает все сферы деятельности людей. Наибольший вклад в ее развитие сегодня вносят представители экономических наук. Количественные оценки и прогнозы по интеграции и дезинтеграции государств и территорий получены исследователями в области политической экономики. Оценки военной мощи и оборо-

носпособности государств основаны на построении индексов, расчетах по соотношению сил сторон и экспертных опросах.

## 2.2. Базовая модель безопасности

Перечислим постулаты, на основе которых построена базовая модель безопасности [392].

**Постулат № 1** (постулат Аристотеля или закон эмерджентности: свойства системы не сводятся к «сумме» свойств ее элементов). Национальная безопасность не редуцируется к набору частных видов безопасности (военной, экономической, государственной, общественной, транспортной, продовольственной и др.) и не выводится из них.

**Постулат № 2** (постулат дуализма ценностей безопасности). Национальная безопасность определяется через дуализм ценностей *развития* (суверенитета) и защищенности (*сохранения*). Развитие и сохранение социальных систем (онтологическая безопасность) есть процесс и результат разрешения дихотомии ценностей свободы и ответственности, размежевания и сплоченности, конкуренции и кооперации, индивидуализации и социализации. Социологи Р. Парк и Э. Берджес выделили два важнейших социальных процесса: конкуренция (лат. *concurrere* – сталкиваться, соперничать) и кооперация (лат. *cooperatio* – сотрудничество) [1]. Культура, являясь знаковой системой, формирует социальные связи между людьми (коммуникативность, сплоченность и размежевание), их отношение к самим себе и своему окружению, включая природу [291]. В психологии универсальной дихотомией является дихотомия индивидуализации и социализации (базовая потребность в самоуважении реализуется через групповое членство). В любой социальной группе существуют различия (возрастные, профессиональные, языковые, этнические и др.). В то же время группа характеризуется способностью нейтрализации потенциальных конфликтов, переводу их в источник развития.

**Постулат № 3** (постулат С. Нефедова и Е. Балацкого, *слагаемые развития и суверенитета*). Три ключевых фактора влияют на человеческую историю и определяют состояние общества и государства: *география*, *демография* и *технологии* [244]. Названным факторам можно поставить в соответствие показатели: численность населения страны, площадь ее территории и уровень социальных технологий. Первые два показателя (численность населения и площадь) определяют базовую суверенность государства, третий – способности государства и общества по формированию и реализации проектов развития.

**Постулат № 4** (*постулат Н. Макиавелли, Наполеона и В.И. Ленина, проверка социальных институтов войной*). Крепость и силу государства (союза государств) и общества можно оценить по результатам военных действий, поскольку в ходе войны «все политические и социальные учреждения подвергаются проверке и испытанию «огнем и мечом». Сила и слабость учреждений и порядков любого народа определяется исходом войны и последствиями ее» [202, с. 245].

**Постулат № 5** (*постулат Г.К. Жукова и Н. Тельновой, познаваемость сложных иерархических социальных систем как следствие принципа самоподобия*). Принцип самоподобия означает возможность суждения о целом по его части. По отдельным поступкам можно судить о субъекте, по субъектам – об обществе, по обществу – об общем состоянии мира [334, с. 19]. Данный постулат позволяет формально одинаковым способом описать возможности по самосохранению социальной системы любого уровня (от малой социальной группы до союза государств). Г.К. Жуков выделял одни и те же факторы (см. выше), влияющие на успех любого боя, сражения, операции [309]. Иными словами, факторы успеха одни и те же на тактическом, оперативном и стратегическом уровнях.

**Постулат № 6** (*постулат Э. Равенштейна и В. Рейли, правило выбора индивидуального актора*). Индивиды (мигранты) выбирают страну–назначение с учетом соотношения уровней валового внутреннего продукта (ВВП) на душу населения, урбанизации, степени разнородности между странами и существующего административно-правового режима миграции. Поскольку безопасность является базовой потребностью индивида [223], то множество людей постоянно оценивают уровень безопасности разных стран (регионов), на основе этой оценки принимают решение о миграции. И эти решения – результаты оценок безопасности (и ее «слагаемых») могут использоваться для оценки параметров модели.

### 2.2.1. Функция безопасности

В математике дуализму ценностей соответствует мультипликативная функция. Тогда, исходя из 2-го постулата, национальной безопасности поставим в соответствие **функцию  $u_i$  безопасности  $i$ -го государства** [392]:

$$u_i = w_i q_i, \quad (2.2.1)$$

где:  $w_i > 0$  – функция суверенности (развития)  $i$ -го государства;  $0 \leq q_i \leq 1$  – функция сохранения  $i$ -го государства.

Функция безопасности (2.2.1) соответствует постулату Аристотеля о невыводимости национальной безопасности из ее частных видов.

Исходя из 3-го и 5-го постулатов и следуя сложившейся традиции [86; 441; 501], функции суверенности и сохранения определим с использованием степенных функций:

$$w_i = A_i w_{bi}, \quad (2.2.2)$$

$$A_i = (1 + I_i)^\chi, \quad (2.2.3)$$

$$w_{bi} = (z_i / z_{\max})^{\omega_z} (s_i / s_{\max})^{\omega_s}, \quad (2.2.4)$$

$$q_i = (\zeta_i / z_i)^{\mu_i / \delta_i}, \quad (2.2.5)$$

описание показателей которых указаны в таблице 2.2.1.

Таблица 2.2.1. Характеристики функции безопасности

| Показатель              | Характеристика  |
|-------------------------|---|
| $A_i$                   | Функция социальных технологий $i$ -го государства                                       |
| $w_{bi}$                | Функция базовой суверенности $i$ -го государства  |
| $I_i$                   | Индекс социальных технологий $i$ -го государства  |
| $\chi$                  | Параметр реализации социальных технологий в действия (степень технологического фактора) |
| $z_i$ и $z_{\max}$      | Численность населения $i$ -й страны и численность населения Китая (Индии)               |
| $s_i$ и $s_{\max}$      | Площадь территории $i$ -й страны и площадь территории России                            |
| $\omega_z$ и $\omega_s$ | Параметры функции базовой суверенности  |
| $\zeta_i$               | Численность государствообразующего этноса в $i$ -й стране                               |
| $\mu_i$                 | Параметр этнической разнородности в $i$ -й стране                                       |
| $\delta_i$              | Параметр притяжения государствообразующего этноса $i$ -й страны                         |

Объединив указанные выражения, получим формулу для вычисления функции безопасности  $i$ -й страны:

$$u_i = (1 + I_i)^\chi \left( \frac{z_i}{z_{\max}} \right)^{\omega_z} \left( \frac{s_i}{s_{\max}} \right)^{\omega_s} \left( \frac{\zeta_i}{z_i} \right)^{\mu_i / \delta_i}. \quad (2.2.6)$$

Отметим, что функция сохранения (2.2.5) подчиняется распределению Парето, обладающего свойством самоподобия [249], а параметр этнической разнородности вычисляется как средневзвешенное значение по всем этносам страны (с учетом их численности). Использование свойства самоподобия и распределения Парето позволяет с единых позиций описывать сложные иерархические системы безопасности, где на нижних уровнях различия обусловлены возрастными, психологическими и иными характеристиками людей. На средних уровнях часть различий игнорируется и рассматриваются преимущественно социально-экономические и этнические характеристики, а на высших уровнях – цивилизационные характеристики.

Принцип самоподобия наблюдается в действительности и в науках о человеке и обществе. Известно, что психология имеет своим предметом уровни личности и индивидуальных коммуникаций, а социология – уровни группового, коллективного и массового взаимодействия. Вместе с тем, «все многочисленные учебники по этим дисциплинам имеют примерно одинаковый состав излагаемого материала и отличаются лишь акцентами» [252, с. 23–24].

Рассмотрим определение функции безопасности для союзов государств. Положим, что функция суверенитета Союза (меж- или надгосударственного образования) есть сумма значений функций суверенитета (возможно, взятая с определенным весовым коэффициентом), а функция сохранения подчиняется распределению Парето (в силу свойства самоподобия). Тогда безопасность Союза вычисляется по формулам:

$$u_S = w_S q_S, \quad w_S = \sum_{i=1}^n \beta_i w_i, \quad q_S = \left( \frac{\zeta_S}{\sum_{i=1}^n z_i} \right)^{\mu/\sigma}, \quad \mu = \frac{\sum_{i=1}^n [1 + \beta_i (\mu_i - 1)] z_i}{\sum_{i=1}^n z_i}, \quad (2.2.7)$$

где:  $w_S$  – функция суверенитета Союза;  $q_S$  – функция сохранения;  $n$  – количество стран – членов Союза;  $\zeta_S$  – численность населения союзообразующей страны (стран);  $z_i$  – численность населения  $i$ -й страны;  $\sigma$  – параметр притяжения союзообразующей страны (стран);  $0 < \beta_i \leq 1$  – степень участия  $i$ -й страны в Союзе.

Совокупность параметров  $\beta_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) отражает вид государственного (межгосударственного) устройства Союза. При  $\beta_i \rightarrow 1$  имеем унитарное государство. При понижении значений  $\beta_i$  выполняется переход к федерации, конфедерации, содружеству и т. д. На примере Британской империи видим, что для разных стран значения параметра  $\beta_i$  существенно отличались (коронные земли, протекторат, доминионы и т. д.).

### 2.2.2. Оценка параметров функции суверенности

**Индекс социальных технологий.** Вид выражения (2.2.3) определяется существующей традицией использования индексов (индекс человеческого развития, глобальный индекс инноваций и др.) в социально-политической сфере. Например, индекс человеческого развития [151] включает в себя усредненные данные по трем основным аспектам человеческого развития: долголетие, доступ к образованию и достойный уровень жизни.

К сожалению, во многих исследованиях упускается из виду важнейшая функция семьи – репродуктивная функция, благодаря которой обеспечивается биологическое воспроизводство населения. Если современная европейская цивилизация и является наследницей цивилизации античной, то это наследие заключается не только и не столько в продолжении традиций античной науки, а в высоких темпах роста населения (на определенном этапе развития). В частности, важнейшее условие начала промышленной революции в Англии – чрезвычайно высокие темпы роста населения; с 1800 г. население удвоилось: в Англии – до 1850 г., в Шотландии и России – к 1870 г., в Германии, Польше, скандинавских странах – к 1890 г. [205, с. 23]. Такие социальные институты, как конкуренция и кооперация формируются в первую очередь в семье и существенно зависят от темпов роста населения в стране.

Глобальный индекс инноваций GI включает около 80 различных переменных и рассчитывается как взвешенная сумма оценок двух групп показателей [461]: располагаемые ресурсы и условия для проведения инноваций (Innovation Input); достигнутые практические результаты осуществления инноваций (Innovation Output).

А. Н. Зубец полагает, что важнейшими характеристиками качества жизни людей являются [147]: валовой внутренний продукт (ВВП) на душу населения, уровень развития образования, уровень урбанизации и другие. Многими исследователями отмечается устойчивая положительная корреляционная зависимость между уровнем урбанизации и показателями качества жизни (уровень образования и продолжительность жизни). Уровень урбанизации в качестве одного из семи - десяти показателей учитывается при расчете индекса первичной модернизации (относится к периоду времени с 1500 г. по н. в.) [267].

Определим индекс социальных технологий<sup>1</sup> как совокупность трех показателей: 1) *уровень урбанизации* (результат исторического развития, прошлое); 2) *уровень валового внутреннего продукта (ВВП) на душу населения* (настоящее) и 3) *темпы роста численности населения* (будущее). Здесь видим связь структуры показателей со свойством человеческого мышления: мышление – процесс, который как бы связывает прошлое, настоящее и будущее, становится над временем, устанавливая связь причин (прошлого), следствий (будущего) и условий реализации причинно-следственных отношений (настоящего) [307].

---

<sup>1</sup> Термин технология нами используется в широком смысле, как совокупность методов и инструментов для достижения желаемого результата; способ преобразования данного в необходимое.

На основании исторических данных [518] и данных Всемирного банка, характеризующих уровни социально-экономического развития ряда государств, в [392] выполнен расчет индекса социальных технологий  $i$ -й страны по формуле:

$$I_i = \alpha_V \frac{V_i}{V_{\max}} + \alpha_D \frac{D_i}{D_{\max}} + \alpha_N \frac{N_i}{N_{\max}}, \quad \alpha_V + \alpha_D + \alpha_N = 1, \quad (2.2.8)$$

где:  $V_i$  – ВВП на душу населения  $i$ -й страны;  $D_i$  – доля городского населения в  $i$ -й стране;  $N_i$  – прирост населения  $i$ -й страны;  $V_{\max}$ ,  $D_{\max}$ ,  $N_{\max}$  – максимальные значения указанных показателей (по исследуемым государствам);  $\alpha_V$ ,  $\alpha_D$ ,  $\alpha_N$  – весовые коэффициенты, отражающие важность показателей  $V_i$ ,  $D_i$  и  $N_i$ .

На рис. 2.2.1 для некоторых стран показаны значения индекса  $I_i$  и индекса инноваций GII за 2013–2014 гг.

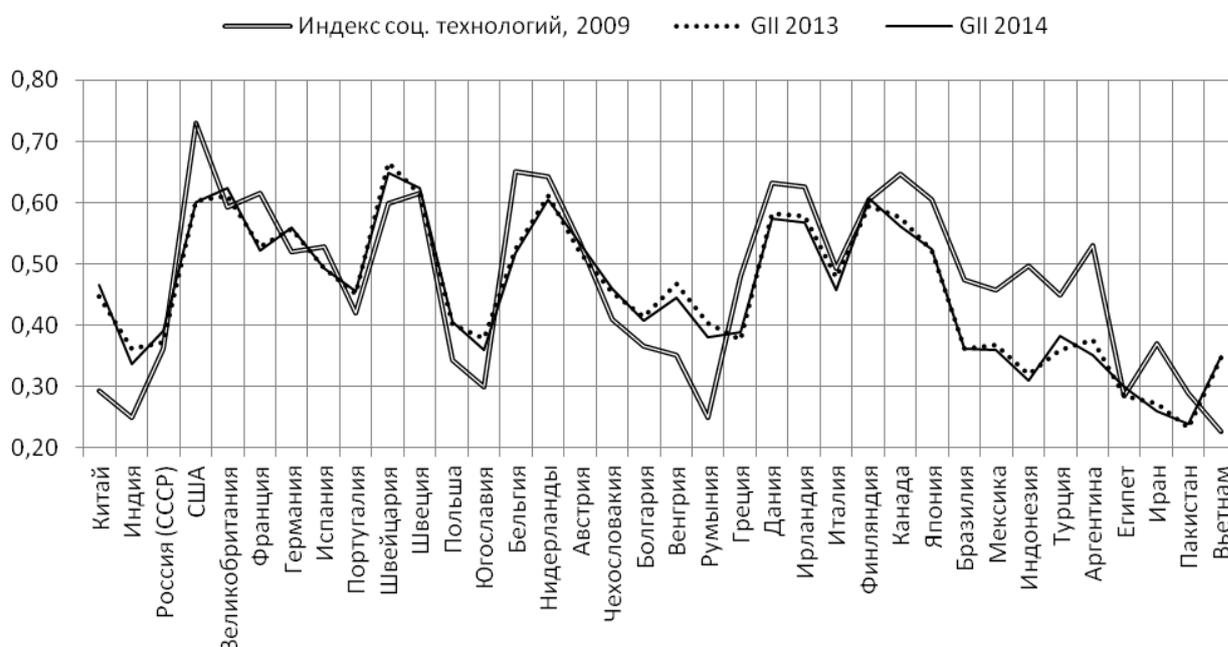


Рис. 2.2.1. Значения индекса социальных технологий и индекса GII

В силу медленных темпов изменения показателей, входящих в выражение (2.2.8), значения индекса  $I_i$  за 2009 г. и 2014 г. практически совпадают. Вместе с тем, во многих государствах переписи населения произведены ранее 2014 г. (Россия – 2010 г., США – 2010 г., Германия – 2011 г.).

Методом наименьших квадратов получены следующие значения весовых коэффициентов:  $\alpha_V = 0,36$ ;  $\alpha_D = 0,37$ ;  $\alpha_N = 0,27$ . При этом коэффициент корреляции между значениями индексов  $I_i$  и GII равен 0,80. Можно предположить, что при оценке индекса GII эксперты в значительной мере опирались на достигнутый государством уровень экономического развития, чем на перспективные тенденции развития, определяемые ростом численности

населения. Сравнивая значения индекса ГИ за 2013 и 2014 годы (Румыния 40,3% и 38,1%; Венгрия – 46,9% и 44,6%; Иран – 27,3% и 26,1%; Аргентина – 37,7% и 35,1%) можно предположить, что индекс ГИ существенно ориентирован на учет факторов краткосрочного действия.

Поскольку нет логических оснований для выделения из трех показателей наиболее важных, то можно считать их одинаково значимыми, т. е. для целей долгосрочного планирования и прогнозирования положить:  $\alpha_V = \alpha_D = \alpha_N = 1/3$ . При этом коэффициент корреляции между значениями индексов  $I_i$  и ГИ равен 0,75 (достаточно высокое значение для социально-политических моделей).

На рис. 2.2.2 показаны значения индекса инноваций ГИ и расчетные значения индекса социальных технологий за 2022 г. для крупнейших стран мира. Коэффициент корреляции между ними равен 0,59, тогда как коэффициент корреляции между индексом ГИ и ВВП на душу населения равен 0,91. Что дополнительно свидетельствует об ориентации индекса ГИ на решение текущих, а не перспективных прогнозных задач.

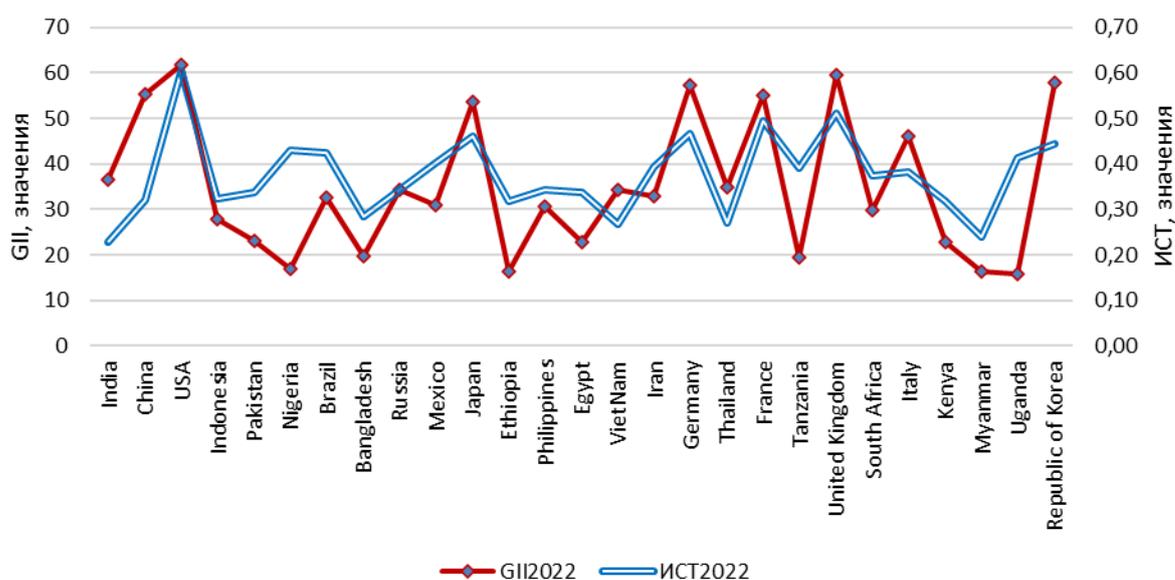


Рис. 2.2.2. Значения индекса социальных технологий и индекса ГИ, 2022 г.

**Степень технологического фактора.** В ходе боевых действий в Первой мировой войне Франция потеряла погибшими и умершими военнослужащими 3,2% населения, тогда как в ее колониях доля погибших составила 0,44% (в семь раз меньше) [233; 349]. Для оценки степени  $\chi$  воспользуемся выражением:

$$\sum_{j \in J_i} \Delta_{ij} z_j = (1 + I_i)^\chi z_i, \quad (2.2.9)$$

где:  $J_i$  – множество стран, являющихся союзниками (доминионами)  $i$ -й страны, включая союзообразующее государство (метрополию);  $\Delta_{ij}$  – отношение доли погибших в  $j$ -й стране к доли погибшим в метрополии ( $i$ -й стране).

Содержательно левая часть выражения (2.2.9) есть численность «эффективного населения»  $i$ -й страны, учитывающая вклад союзников в решение жизненно важных дел метрополии (союзообразующего государства). При значении индекса  $I_i = 0,41$  социальных технологий Франции в 1913 г. получим:

$$48,65 = 41,463(1 + I_i)^\chi, \quad \chi = \ln(1,17)/\ln(1,41) = 0,47.$$

Для Великобритании в 1913 г. индекс равен  $I_i = 0,71$ . Получим:  $\chi = 0,46$ . Используя основные демографические показатели Германии и ее сателлитов накануне Второй мировой войны [82; 264; 273; 429], получим следующую оценку степени:  $\chi = 0,35$ . Относительно небольшое значение степени для Германии можно объяснить малым сроком существования Третьего рейха.

В ходе войны США в Ираке в период с 2003 г. по 2010 г. армия США потеряла 4429 человек. При  $I_i = 0,68$  для США находим:  $\chi = 0,13$ . Низкое значение степени технологического фактора для США по данным в войне с Ираком можно объяснить следующими причинами:

– в войне преследовались в основном экономические цели (на вопрос «Как вы думаете, в чем причина вовлеченности США в ситуацию с Ираком и почему наши войска находятся в Саудовской Аравии?» 49% опрошенных американцев ответили: «Чтобы защитить наши экономические интересы и доступ к нефти» [195]);

– относительная институциональная неоформленность, временность созданной международной коалиции.

Таким образом, получена *нижняя оценка* степени технологического фактора  $\chi \approx 0,13-0,5$ , отражающую возможности государства по эффективно-му удержанию контролируемых территорий и населения и созданные для этой цели институты. Минимальное значение степени (0,13) характерно для ситуаций, когда преследуются преимущественно экономические интересы. Если речь идет о военной безопасности, реализации социально-политических целей, то следует использовать значение 0,5.

Верхняя оценка степени технологического фактора находится для отдельных сфер деятельности. В частности, применительно к экономике для оценки роли крупнейшей экономической державы можно использовать значение  $\chi \geq 1,2-1,4$ . Содержательно верхняя оценка степени характеризует возможности государств по формированию наднациональных институтов,

привлечению союзников, расширению зоны национальных интересов [392].

Сведем в таблицу возможные значения степени технологического фактора (табл. 2.2.2).

Таблица 2.2.2. Возможные значения степени технологического фактора

| Назначение   | Возможные значения степени технологического фактора           |  |  |
|--|---|--|--|
| Формирование новых институтов (верхняя оценка степени)             | 0,5–1,5<br>Оценки выполняются для отдельных сфер деятельности |  |  |
| Привлечение институтов для решения задач национальной безопасности | 0,1–0,2<br>Задачи экономического характера                    | 0,2–0,5<br>Задачи военно-политического характера | Больше 0,5<br>Защита жизненно важных интересов |

**Параметры функции базового суверенитета.** Н. Макиавелли считал, что создание национальной армии является первоочередным условием создания общенационального государства. Предположим, что численности вооруженных сил государств отражают их базовый суверенитет. Тогда для оценки параметров эластичности по населению и территории можно воспользоваться методом наименьших квадратов:

$$\min_{\omega_z, \omega_s > 0} \sum_{i=1}^N \left( \left( \frac{z_i}{z_{\max}} \right)^{\omega_z} \left( \frac{s_i}{s_{\max}} \right)^{\omega_s} - \frac{N_{Mi}}{\max_{i=1, \dots, N} N_{Mi}} \right)^2, \quad (2.2.10)$$

где:  $N$  – количество государств;  $N_{Mi}$  – численность вооруженных сил  $i$ -го государства.

Используя численности вооруженных сил крупнейших государств мира по состоянию на 2006 г. для  $N = 87$ , получим  $\omega_z \approx 0,5$ ,  $\omega_s \approx 0,2$ . Если наложить дополнительное условие:  $\omega_z + \omega_s = 1$ , то  $\omega_z \approx 0,6$ ,  $\omega_s \approx 0,4$ .

### 2.2.3. Оценка параметров функции сохранения

Пусть  $z_i$  есть численность населения  $i$ -го региона (субъекта федерации, административно-экономического района, страны, союза),  $z_{ij}$  – численность  $j$ -го этноса (национальности) в нем, причем

$$z_i = \sum_{j=1}^{n_i} z_{ij}, \quad \zeta_i = \max_{j=1, \dots, n_i} z_{ij}, \quad (2.2.11)$$

где  $n_i$  – количество этносов в  $i$ -м регионе,  $\zeta_i$  – численность регионообразующего этноса. В силу того, что государство является иерархической структурой, допустим, что социальные взаимодействия осуществляются только по линии

регионообразующий этнос – другой этнос, а взаимодействиями между нерегионообразующими этносами можно пренебречь. Регионообразующий этнос  $i$  характеризуется параметром  $\delta_i > 0$  притяжения, отражающим способность этноса к объединению других этносов в единую общественную единицу. Каждый этнос  $i$ -го региона характеризуется параметром разнородности  $\mu_{ij} \geq 1$  с регионообразующим этносом (для регионообразующего этноса положим  $\mu_{ij} = 1$ ).

Используя распределение Парето, определим *функцию сохранения*  $i$ -го региона (государства), см. выражение (2.2.5):

$$q_i = \left( \frac{\zeta_i}{z_i} \right)^{\mu_i/\delta_i}, \quad \mu_i = \frac{1}{z_i} \sum_{j=1}^{n_i} \mu_{ij} z_{ij}. \quad (2.2.12)$$

Эта функция имеет два параметра:  $\zeta_i$  – параметр сдвига и  $\delta_i/\mu_i$  – параметр формы. Чем выше однородность населения (доля регионообразующего этноса), тем больше значение функции сохранения. Для разнородного (полиэтнического) региона комфортность проживания в нем определяется значением параметра формы: чем меньше величина отношения  $\delta_i/\mu_i$ , тем комфортнее проживание и тем меньше деструктивных действий, причинами которых выступают объективно существующие различия. Причем параметр  $\mu_i$  отражает существующие различия, а параметр  $\delta_i$  – способности и возможности по их смягчению.

Иными словами, параметры  $\mu_i$ ,  $\delta_i$  отражают дихотомию ценностей конкуренции – кооперации, размежевания – сплоченности, индивидуализации – социализации (*постулат № 2, дуализм ценностей безопасности*).

Внутри одной страны существуют межрегиональные и другие различия, отражающие неравномерности социально-экономического развития и могущие приводить к напряженности и конфликтам. Для оценки этих различий введем функцию внутренней безопасности  $j$ -го региона  $i$ -й страны:

$$u_{rj}(\delta_i) = K_{rj} q_{rj} = K_{rj} \left( \frac{\zeta_{rj}}{z_{rj}} \right)^{\mu_{rj}/\delta_i}, \quad (2.2.13)$$

где:  $K_{rj}$  – уровень социально-экономического развития  $j$ -го региона;  $q_{rj}$  – функция сохранения  $j$ -го региона в составе страны;  $z_{rj}$  – численность населения в  $j$ -м регионе;  $\zeta_{rj}$  – численность крупнейшего этноса  $j$ -го региона;  $\mu_{rj}$  – параметр разнородности этносов в  $j$ -м регионе;  $\delta_{rj}$  – параметр притяжения государствообразующего этноса  $i$ -й страны.

**Оценка параметров функции сохранения.** На основании третьего постулата для этносов существующего государства (союза) параметр разнородности между государствообразующим этносом (национальностью)  $s$

и этносом  $j$  определим по формуле:

$$\mu_{sj} = B_{Cs} / B_{Cj}, \quad (2.2.14)$$

где:  $B_{Cs}$  – доля потерь от численности этноса  $s$ ;  $B_{Cj}$  – доля потерь от численности этноса  $j$ .

В войнах (и событиях, затрагивающих безопасность и жизнеспособность государства) ведущую роль играет государствообразующий этнос, на его плечи ложатся основные издержки, он несет максимальные потери убитыми и ранеными. Разумеется, в истории возможны исключения, скорее подтверждающие правило (в 300-е годы армия Западной Римской империи комплектовалась преимущественно германцами и другими варварами, доля римлян в ней неуклонно снижалась; наемная армия времен упадка Византии и др.). Другие способы оценки параметра разнородности представлены в работе [392].

Помимо исследователей, безопасность проживания в тех или иных странах и регионах косвенно оценивается гражданами, мигрирующими в поисках лучших и безопасных условий жизни. Тогда, используя функцию внутренней безопасности (2.2.12), оценим параметр притяжения  $\delta_i$  государствообразующего этноса методом наименьших квадратов:

$$\delta_i = \text{ArgMin} \sum_{j=1}^{K_R} (\ln(u_{rj}(\delta_i)) - \ln(m_j))^2, \quad (2.2.15)$$

где:  $K_R$  – количество регионов;  $m_j$  – коэффициент миграционного прироста в  $j$ -м регионе (параметр миграции).

По данным государственных статистик получены следующие значения параметра сохранения [392]:

|         |         |          |           |         |
|---------|---------|----------|-----------|---------|
| Россия  | США     | Германия | Казахстан | Украина |
| 1,0–3,0 | 1,0–2,1 | 1,0–1,5  | 0,7–1,3   | 0,5–0,8 |

Большие значения параметра сохранения ( $\delta > 1$ ) отражают высокие возможности государствообразующего этноса по формированию устойчивых социально-политических институтов. Такие значения имели древние римляне, парфяне, китайцы, т. е. те народы, которые создавали империи и в течение веков поддерживали их эффективное функционирование. Малые значения параметра ( $\delta < 0,5-0,6$ ) имеют народы, не сумевшие создать свою государственность (курды, сикхи, цыгане, уйгуры и др.).

Базовая модель безопасности дает основания поставить в соответствие уровням деятельности (см. табл. 2.1.1) количественные показатели (табл. 2.2.3).

Таблица 2.2.3. Уровни деятельности и показатели безопасности

| Уровень       | Типовой объект           | Показатели безопасности  |
|---------------|--------------------------|--|
| Культурный    | Этнос, народ             | Параметр притяжения (способность этноса создавать и поддерживать устойчивые национальные образования), параметр этнической разнородности |
| Политический  | Государство, институт    | Степень технологического фактора (способности государства по реализации социальных возможностей в действия)                              |
| Экономический | Организация, предприятие | ВВП на душу населения, индекс антихрупкости и др.  |
| Социальный    | Общество                 | Индекс социальных технологий, функция сохранения, темпы естественного роста населения  |

На уровень безопасности оказывает влияние миграция. Как показывает история ряда стран, начиная с Западной Римской империи, неконтролируемая миграция может существенно изменить этнический состав населения страны, а в некоторых случаях – и к краху государства, межэтническим и социальным конфликтам.

#### 2.2.4. Модель миграции населения

Пользуясь моделью безопасности, определим потоки миграции  $M_{ij}$  из страны  $i$  в страну  $j$ , основанные на факторах притяжения:

$$M_{ij} = k_{mi} \frac{w_{bj} D_j (V_j / V_i) (1 - P_{Rij})}{(\mu_{ij})^2 \sqrt{r_{ij} / r_{i\min}}}, \quad r_{i\min} = \min_j r_{ij}, \quad (2.2.16)$$

где:  $k_{mi}$  – параметр миграции  $i$ -й страны;  $w_{bj}$  – базовая суверенность  $j$ -го государства;  $V_i$  – ВВП на душу населения  $i$ -й страны;  $V_j$  – ВВП на душу населения  $j$ -й страны;  $D_j$  – доля городского населения в  $j$ -й стране;  $r_{ij}$  – расстояние между странами  $i$  и  $j$ ;  $r_{i\min}$  – расстояние от страны  $i$  до ближайшей страны из рассматриваемого списка стран;  $\mu_{ij}$  – параметр разнородности;  $0 \leq P_{Rij} \leq 1$  – индекс административно-правового режима, действующего в отношении граждан, пытающихся мигрировать из  $i$  в  $j$ . При  $P_{RMij} = 0$  отсутствуют какие-либо ограничения на миграцию между странами  $i$  и  $j$ . Соответственно, при  $P_{RMij} = 1$  невозможна легальная и нелегальная миграция из страны  $i$  в страну  $j$ .

В терминах гравитационной модели миграции В. Рейли [444] базовая суверенность есть мера значимости страны притяжения, отношение ВВП на душу населения – экономический параметр притяжения; расстояние между странами и параметр разнородности характеризуют меру различий. В модели

учитывается тот факт, что с увеличением расстояния транспортные расходы на единицу расстояния сокращаются.

На рис. 2.2.3 показаны график долгосрочной миграции из Украины в 2011-2012 гг. (сплошная линия) и график беженцев из Украины за 6 месяцев<sup>1</sup> с февраля 2022 г. (гистограмма).

Коэффициент корреляции между данными долгосрочной миграции 2011-2012 гг. и потоком беженцев равен 0,88. Больше всего людей из Украины приняла Россия (2 852 395 чел.).

Из анализа данных миграции можно сделать два вывода. Во-первых, факторы, определяющие потоки миграции, имеют фундаментальный характер (этническая близость народов и т. д.) и мало зависят от пропаганды и политических предпочтений правящего режима. Во-вторых, модель миграции может использоваться в целях средне- и долгосрочного прогнозирования.

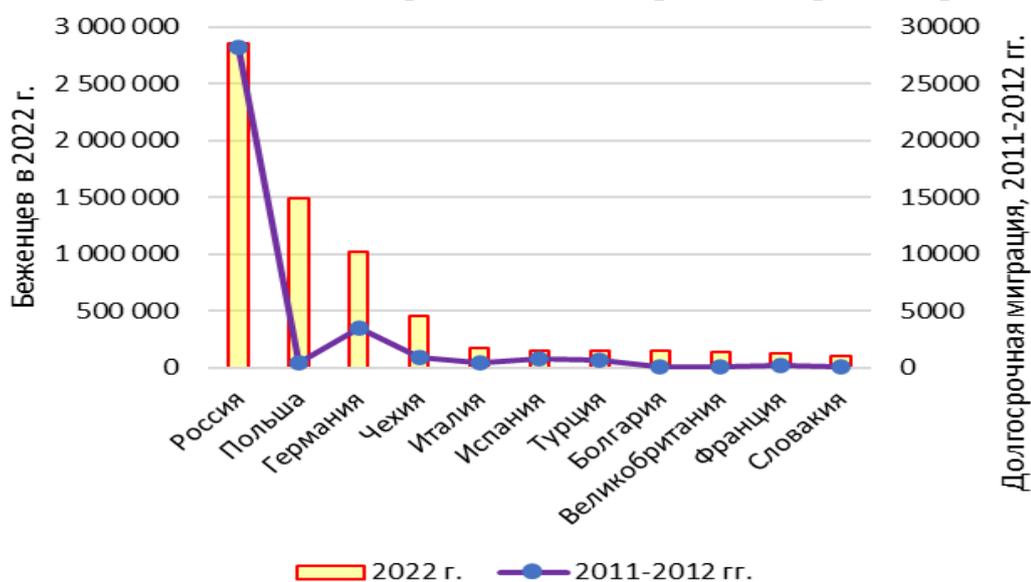


Рис. 2.2.3. Долгосрочная миграция и беженцы из Украины

Таким образом, выше приведена базовая модель безопасности, основанная на дихотомии ценностей развития и сохранения, на достаточном объеме исторических данных выполнена оценка ее параметров. Модель предназначена для выявления тенденций долгосрочного характера, влияющих на обстановку в мире и отдельных странах. Рассмотрим ряд приложений общей модели.

<sup>1</sup> Sputnik Ближнее зарубежье. В какие страны уехали беженцы с Украины. 10.11.2022. – URL: <https://t.me/sputniklive/50244> (дата обращения – 20.04.2023).

## 2.3. Приложения модели безопасности

### 2.3.1. Модели геополитической инверсии

Имея модель безопасности с простыми и измеримыми параметрами, для любого государства можно выполнить расчеты за достаточно большой исторический период. На рис. 2.3.1 показаны значения функции безопасности пяти крупнейших стран мира<sup>1</sup>.

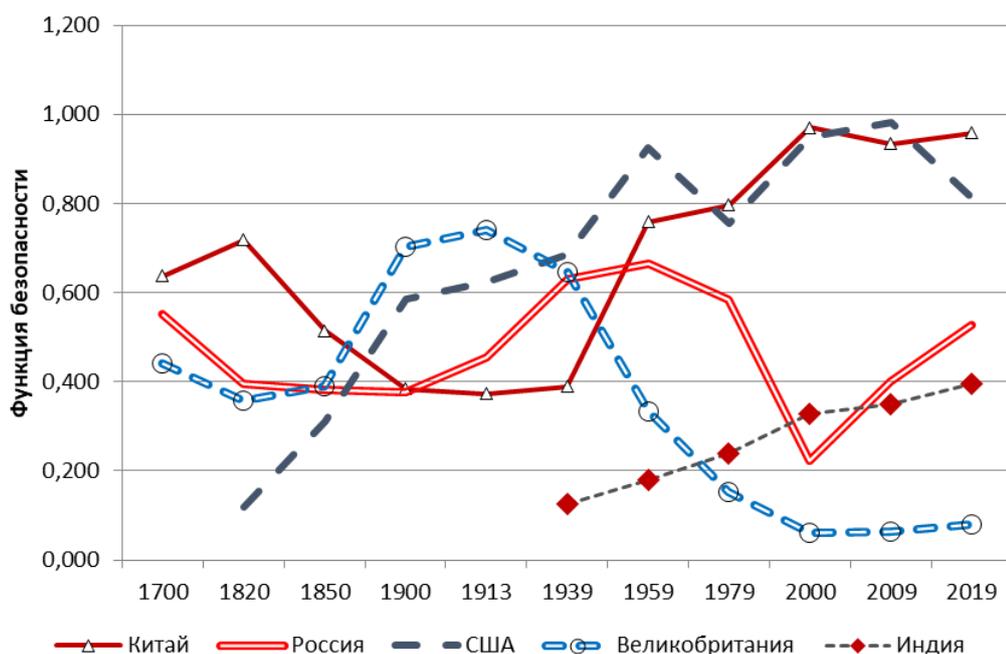


Рис. 2.3.1. Функции безопасности крупнейших стран мира

В результате высоких темпов естественного роста численности населения и в силу других причин Англия стала крупнейшей морской державой, мастерской мира, заселила своими колонистами многие земли в разных частях света. Столетие (1815–1914 гг.) Великобритания конкурировала с Российской империей в борьбе за наследство Османской империи, Персии и Цинского Китая. Расцвет могущества Британской империи одновременно сопровождался уменьшением доли «белого» населения, высокими затратами на поддержание имперских институтов, и, как следствие, снижением эффективности империи. Период с 1945 г. по 1991 г. прошел под знаком конкуренции двух сверхдержав – США и СССР. Настоящее время характеризуется уходом от однополярного мира и увеличением экономического и политического влияния КНР.

<sup>1</sup> Можно заметить определенную корреляцию результатов расчетов по модели безопасности и по обобщенному индексу богатства и силы стран (см. рис. 2.1.1).

Уже в начале XXI века Китай по своим возможностям догнал США. Однако на США все еще работают созданные ими международные институты (МВФ, ВБ, НАТО, военные базы, доллар как мировая валюта и т. д.). Вместе с тем, в конкурентной борьбе с Россией, Ираном и КНР англосаксонский мир вводит санкции, ограничения, разрушая тем самым и собственные институты.

Актуальной задачей является разработка моделей динамики геополитической инверсии с более подробным учетом государственных и социальных институтов и с использованием методов социальных, политических, экономических и других научных дисциплин. В содержательном плане важно учитывать как классические работы (К. Маркс, М. Вебер, Н. Кондратьев, Ф. Бродель, И. Валлерстайн и др.), так и работы современных авторов, изучающих тектонические сдвиги, связанные со становлением многополярного мира и концепции геополитического доминирования (Дж. Арриги, Е. В. Балацкий<sup>1</sup>, Р. Далио, С. А. Караганов и др.).

### **2.3.2. Модели процессов интеграции и дезинтеграции (на примере Европейского Союза)**

В последние десятилетия мир стал свидетелем распада (дезинтеграции) ряда государств. Вместе с тем, наряду с процессами дезинтеграции параллельно идут, хоть и в более замедленном темпе, процессы интеграции и централизации.

А. Д. Гуляков представил результаты исследований (экспертных оценок) для некоторых стран по степени централизации и децентрализации (табл. 2.3.1) [125].

Таблица 2.3.1. Степень централизации/децентрализации в США

| Законодательное регулирование |         |         | Административное регулирование |         |         |
|-------------------------------|---------|---------|--------------------------------|---------|---------|
| 1790 г.                       | 1900 г. | 2010 г. | 1790 г.                        | 1900 г. | 2010 г. |
| 6                             | 5       | 3       | 6                              | 6       | 4       |

Примечание. Число баллов ранжируется от 1 до 7 и означает следующие ситуации: 1 – исключительное регулирование федеральным правительством; 2 – почти исключительное регулирование федеральным правительством; 3 – преимущественное регулирование федеральным правительством; 4 – регулирование осуществляют частично федеральное правительство, частично – субъекты федерации; 5 – регулирование осуществляют преимущественно субъекты федерации; 6 – регулирование осуществляют почти исключительно субъекты федерации; 7 – регулирование осуществляют исключительно субъекты федерации.

<sup>1</sup> См. его работу [36], в которой раскрыты основные элементы американской модели глобального доминирования: идеология (мифологема богоизбранности), методология (доктрина непримиримости), методика (стратегия тотальности) и ограничения на тактику действий (синдром неприятия чрезмерных потерь).

Из таблицы видно, что со временем все больше полномочий переходит от штатов к федеральному правительству.

В табл. 2.3.2 показаны степени централизации и децентрализации для Швейцарии, Германии и Индии [125].

Таблица 2.3.2. Степень централизации/децентрализации в Швейцарии, Германии и Индии

| Швейцария |      |      |      | Германия |      |      |      | Индия |      |      |      |
|-----------|------|------|------|----------|------|------|------|-------|------|------|------|
| ЗР        |      | АР   |      | ЗР       |      | АР   |      | ЗР    |      | АР   |      |
| 1850      | 2010 | 1850 | 2010 | 1950     | 2010 | 1950 | 2010 | 1950  | 2010 | 1950 | 2010 |
| 6         | 5,5  | 6,4  | 4,7  | 3,4      | 3    | 5,3  | 4,7  | 3,3   | 2,9  | 3,7  | 3,5  |

Примечание. ЗР – законодательное регулирование, АР – административное регулирование.

Как видно из таблицы, в Швейцарии, Германии и Индии также наблюдаются тенденции к централизации различных сфер социальной деятельности.

В табл. 2.3.3 представлены некоторые историко-статистические характеристики государств – членов ЕС. Для учета исторических факторов Чехия и Словакия условно объединены в Чехословакию, так же сделано и для стран бывшей Югославии.

Таблица 2.3.3. Основные характеристики стран – членов ЕС (2018 г.)

| Государство    | Член ЕС с года | Население, млн. чел. | Основной язык   | Отношение к Германии во 2МВ | Пленных* | Параметр разнородности |
|----------------|----------------|----------------------|-----------------|-----------------------------|----------|------------------------|
| Германия       | 1957           | 82,3                 | немецк.         |                             | 2388443  | 1,00                   |
| Франция        | 1957           | 64                   | франц.          | оккупац.                    | 23136    | 2,63                   |
| Италия         | 1957           | 58,13                | итальян.        | союзн.                      | 48957    | 2,33                   |
| Нидерланды     | 1957           | 16,7                 | нидерл.         | оккупац.                    | 4730     | 2,20                   |
| Бельгия        | 1957           | 10,4                 | нидерл., франц. | оккупац.                    | 2014     | 2,43                   |
| Дания          | 1973           | 5,5                  | датский         | оккупац.                    | 456      | 2,20                   |
| Ирландия       | 1973           | 4,2                  | англ., ирланд.  | нейтр.                      |          | 2,14                   |
| Великобритания | 1973           | 61                   | англ.           | противн.                    |          | 3,14                   |
| Греция         | 1981           | 10,7                 | греческ.        | оккупац.                    |          | 2,57                   |
| Испания        | 1986           | 41                   | испанск.        | нейтр.                      | 452      | 3,04                   |
| Португалия     | 1986           | 11                   | португ.         | нейтр.                      |          | 3,08                   |
| Австрия        | 1995           | 8,21                 | немецк.         | аншлюс                      | 156681   | 1,75                   |
| Швеция         | 1995           | 9,06                 | шведск.         | нейтр.                      |          | 2,83                   |
| Финляндия      | 1995           | 5,25                 | финск., швец.   | союзн.                      | 2377     | 2,63                   |
| Чехословакия   | 2004           | 15,7                 | чешско-слов.гр. | протекторат                 | 46150    | 2,46                   |
| Венгрия        | 2004           | 9,9                  | венгерск.       | союзн.                      | 513766   | 2,51                   |
| Польша         | 2004           | 38,5                 | польский        | оккупац.                    | 60277    | 2,64                   |
| Румыния        | 2007           | 22,2                 | румынск.        | союзн.                      | 187367   | 2,64                   |
| Болгария       | 2007           | 9,9                  | болгарск.       | союзн.                      |          | 2,85                   |
| Югославия      | 2013           | 23,03                | сербохорватск.  | партизан. дейст.            |          | 2,96                   |

\* Количество военнопленных в лагерях НКВД СССР в 1956 г.

Параметр разнородности  $i$ -й страны (по отношению к Германии – союзобразующему государству) вычислен по формуле:

$$\mu_i = 1 + 0,5 \left( \frac{G_i - 1957}{2015 - 1957} \right) + 0,5 \frac{D_{1i}}{\max D_{1i}} + \frac{D_{2i}}{10} + \frac{D_{3i}}{10}, \quad (2.3.1)$$

где:  $G_i$  – год присоединения к ЕС;  $D_{1i}$  – языковое расстояние (относительно немецкого языка);  $0 \leq D_{2i} \leq 10$  – показатель участия страны в борьбе с Германией в годы Второй мировой войны (значения от 0 – аншлюс до 10 – активные боевые действия против Германии);  $0 \leq D_{3i} \leq 10$  – показатель самостоятельного исторического развития страны. Вычисление языкового расстояния осуществлялось на основе итоговых классификаций языков [299, с. 23].

Для оценки показателя самостоятельного исторического развития страны использовались исторические данные (была ли страна самостоятельна или входила ранее в состав других образований). Например, Греция вышла из состава Османской империи в 1821 г., Ирландия вышла из состава Британской империи в 1922 г., Франция не входила в состав образований, созданных другими странами.

Безопасность ЕС вычислялась по формулам (2.2.7). Значение степени  $\beta_i$  участия  $i$ -й страны в Союзе принято равным 1 для Германии и 0,25 для остальных стран (конфедерация). Результаты вычислений при значении параметра притяжения Германии  $\delta = 1,75$  по состоянию на 2015 г. представлены на рис. 2.3.2 [387].

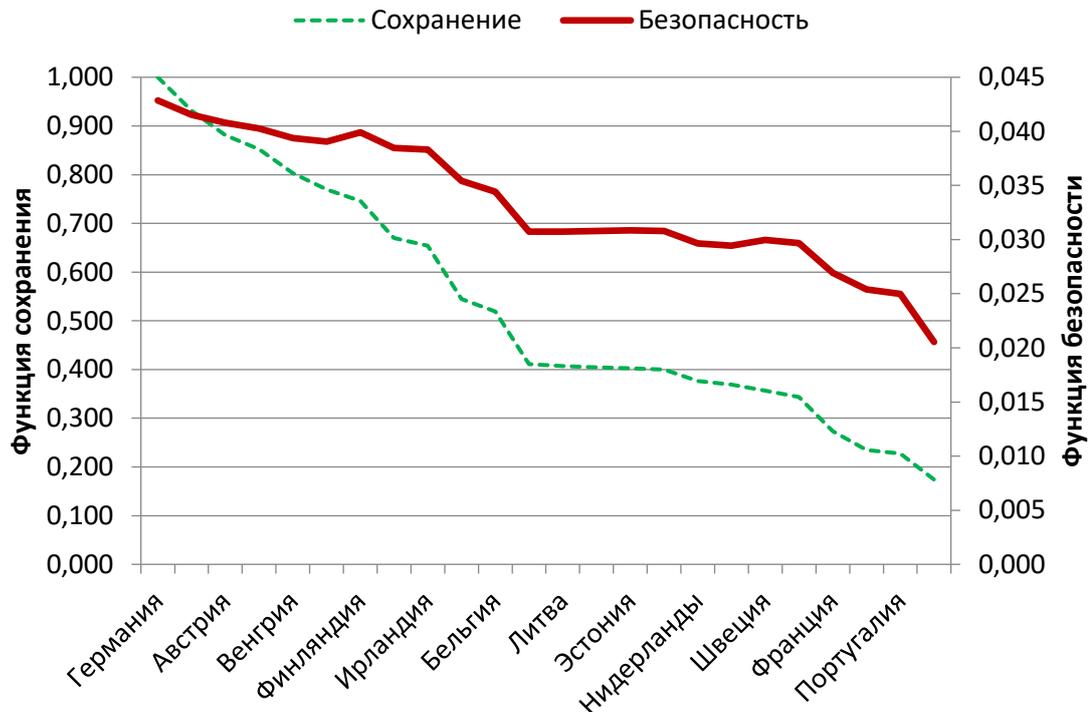


Рис. 2.3.2. Безопасность Европейского Союза как конфедерации

В настоящее время Евросоюз функционирует в форме конфедерации. Неоднократные попытки превращения ЕС в федерацию оказались безрезультатными (провал с ратификацией Конституции ЕС, когда народы Франции и Нидерландов на референдуме высказались против ее принятия). Для объяснения невозможности трансформации ЕС в ее полном составе в федерацию в 2014 году были выполнены прогнозные расчеты по оценке безопасности ЕС как федерации [387]. На рис. 2.3.3 показаны значения функций безопасности и сохранения для Евросоюза как федерации (значение параметра  $\beta_i$  равно 1 для Германии и 0,5 для остальных стран).

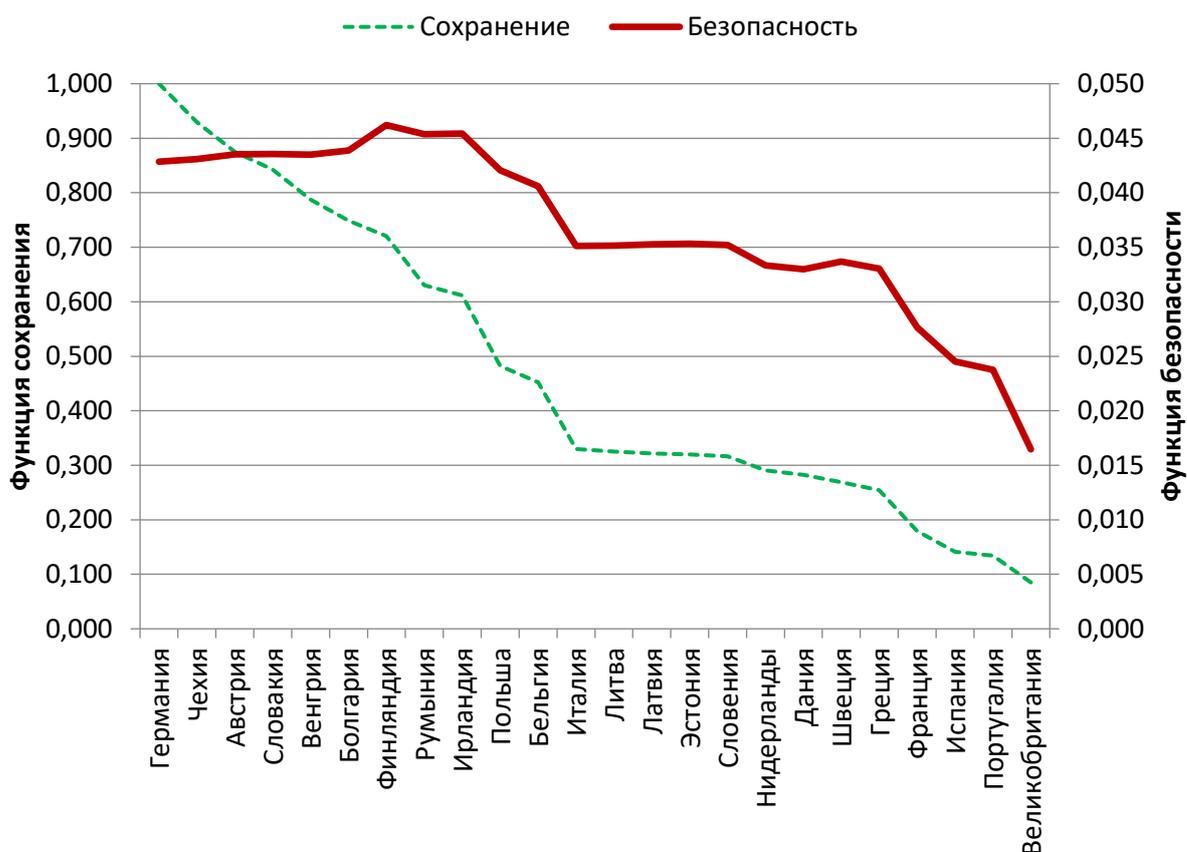


Рис. 2.3.3. Безопасность Европейского Союза как федерации

Из рисунка видно, что устойчивая федерация (значение функции сохранения не ниже 0,6) может состоять не более, чем из девяти-двенадцати стран. Теория безопасности показывает невозможность построения на базе современного Евросоюза устойчиво развивающейся федерации. Результаты расчетов принципиально не изменятся, если в качестве союзо-образующих стран взять Германию и Францию.

Сетевые теоретико-игровые модели интеграции и дезинтеграции рассмотрены в работе [392].

### 2.3.3. Социальные издержки в войнах и военных конфликтах

Почему технологически развитые страны, обладающие многочисленными вооруженными силами и высоким боевым потенциалом проигрывают войны с более слабым противником? Или после победы над ним вынуждены через некоторое время прекратить оккупационные действия и вывести свои войска?

По К. Клаузевицу, война – это акт насилия, имеющий целью заставить противника выполнить нашу волю [167]. В ходе войны обе стороны несут потери, но чувствительности народов к этим потерям могут быть разные.

Способность общества переносить издержки, связанные с военными действиями, определяется главным образом двумя факторами: 1) темпы естественного прироста населения; 2) отношение общества к войне.

В табл. 2.3.4 представлены данные по ежегодному приросту населения некоторых европейских государств в период с 1550 г. по 1900 г. [205].

Таблица 2.3.4. Ежегодный прирост населения в европейских странах (на тысячу жителей)

| Годы      | Франция | Германия | Россия | Италия | Испания | Англия | Швеция |
|-----------|---------|----------|--------|--------|---------|--------|--------|
| 1550-1600 | 0,1     | -        | -      | 3,2    | 4,8     | 6,3    | -      |
| 1600-1650 | 0,7     | -        | -      | -2,9   | 1,0     | 4,8    | -      |
| 1650-1700 | 2,2     | -        | -      | 3,0    | 1,0     | -1,1   | -      |
| 1700-1750 | 1,7     | 1,2      | 8,9    | 3,0    | 3,1     | 3,1    | 5,3    |
| 1750-1800 | 3,5     | 7,3      | 8,9    | 2,9    | 4,2     | 8,0    | 5,5    |
| 1800-1850 | 4,3     | 7,4      | 8,6    | 6,0    | 6,6     | 13,2   | 7,9    |
| 1850-1900 | 2,2     | 9,3      | 12,1   | 6,3    | 4,6     | 12,2   | 7,8    |

Наивысшими темпами в XVIII–XIX вв. растет население Англии и России, благодаря чему были созданы крупнейшие империи. Из стран с высоким приростом населения шли крупнейшие потоки миграции за пределы Европы. Заселение переселенческих колоний в Америке и Азии в основном осуществлялось силами британских и испано-португальских иммигрантов с менее значительным участием голландцев, немцев и французов. Из Италии миграции за пределы Европы практически не было [205].

Можно предположить, что боевой дух войска, характеризуемый процентом выдерживаемых кровавых потерь, в существенной степени зависит от темпов естественного прироста населения страны. Эта же тенденция наблюдается и в Новейшее время [384] (табл. 2.3.5).

Таблица 2.3.5. Потери США в ходе войн

|                                 | Убито  | Ранено | Общая численность ВС США* | % потерь | К-т рождаемости** |
|---------------------------------|--------|--------|---------------------------|----------|-------------------|
| 2-я мировая война 1939-1945 гг. | 407316 | 671846 | 14 903 213                | 7,2      | 20                |
| Корейская война 1950-1953 гг.   | 36570  | 103284 | 5 764 143                 | 2,4      | 20-24             |
| Вьетнамская война 1964-1973 гг. | 58198  | 153363 | 8 752 000                 | 2,4      | 16-18             |
| Война в Персидском заливе       | 383    | 467    | 665 476                   | 0,1      | 12-13             |

\* общее количество военнослужащих, принимавших участие в военной операции,

\*\* количество новорожденных на 1000 населения.

Проценты потерь (убитыми и ранеными) в Корее и Вьетнаме: 2,4 % от общей численности ВС США и, соответственно, 0,09 % и 0,11 % от численности населения. Существенное отличие между двумя войнами заключается в масштабах антивоенных выступлений, дезертирства и отказа от призыва. Так к концу вьетнамской войны количество протестующих в США достигало 1 млн. чел. Рост протестов можно объяснить относительным увеличением ценности человеческой жизни в связи со снижением темпов естественного прироста населения и уменьшением количества детей в семьях. Вероятно, этот фактор явился и основной причиной перехода армии США от службы по призыву к службе по контракту (1970-е гг.).

Рассмотрим простейшую *модель войны* с учетом социальных издержек.

Пусть имеются две стороны, участвующие в конфликте. Обозначим через  $x(t)$  ( $y(t)$ ) численность участников первой (второй) стороны в момент времени  $t > 0$ , численности в нулевой момент времени –  $x_0$  и  $y_0$  соответственно. Пусть первая сторона имеет решающее превосходство в силах и средствах над второй стороной и, вместе с тем, является агрессором, тогда как вторая сторона считает конфликт справедливым, а победу в нем – крайне важной. Обозначим через  $X_0$  и  $Y_0$  численности населения первой и второй страны в момент начала конфликта. Положим, что за время конфликта естественным приростом (убылью) населения можно пренебречь. Обозначим  $\Lambda_x$  и  $\Lambda_y$  выдерживаемую обществом первой и второй страны долю потерь. Рассмотрим модель с вводом резервов – стороны поддерживают численности своих войск на одном уровне, компенсируя потери. Из уравнений Осипова–Ланчестера и условия постоянства численности войск получим:

$$x_R(t) - a_y y(t) = 0, \quad y_R(t) - a_x x(t) = 0, \quad x_R(t) = x_0 - x(t), \quad y_R(t) = y_0 - y(t), \quad (2.3.2)$$

где  $a_x$  и  $a_y$  – коэффициенты боевой эффективности первой и второй стороны;  $x_R(t)$  и  $y_R(t)$  – количество введенного в сражение резерва (равного потерям в ходе боев).

Решение уравнений (2.3.2):

$$x_R(t) = x_0 - x(t) = a_y \frac{y_0 - a_x x_0}{1 - a_x a_y}, \quad y_R(t) = y_0 - y(t) = a_x \frac{x_0 - a_y y_0}{1 - a_x a_y}. \quad (2.3.3)$$

Рассмотрим *пример*. Пусть численности населения воюющих государств равны  $X_0 = 200\,000\,000$  чел.,  $Y_0 = 40\,000\,000$  чел.; численности их войск:  $x_0 = 500\,000$  чел.,  $y_0 = 2\,500\,000$  чел., военные потери за  $t = 9$  лет:  $x_R(t) = 60\,000$  чел.;  $y_R(t) = 1\,000\,000$  чел.

Из (2.3.2) при  $t = 9$  находим:

$$a_x = \frac{y_R(t)/9}{x_0 - x_R(t)/9} \approx 0,225, \quad a_y = \frac{x_R(t)/9}{y_0 - y_R(t)/9} \approx 0,003$$

(коэффициент боевой эффективности боевой единицы первой стороны в 80 раз выше соответствующего коэффициента второй стороны).

Нижние оценки потерь стран равны  $\Lambda_x = 0,03\%$ ;  $\Lambda_y = 2,5\%$ .

Несмотря на значительное технологическое превосходство первой страны (США) над второй (Вьетнамом), первая страна проиграла войну, что можно объяснить в т. ч. неспособностью и неготовностью американского общества нести высокие социальные издержки в войне, цели которой народу не близки.

## 2.4. Методы и технологии сценарного подхода

Сценарный подход представляет собой совокупность методов анализа систем с целью выявления и систематизации возможных вариантов динамики их развития в зависимости от начальных и внешних условий, а также управляющих воздействий [337].

В качестве концепции и методологии планирования и управления развитием сложных организационных систем сценарный подход стал развиваться с конца 60-х гг. XX столетия. В этот же период термин «сценарий» как одна из форм представления информации об альтернативных направлениях развития исследуемых ситуаций во внутренней и во внешней среде стал употребляться практически в своем современном значении. Первой публикацией по сценарному подходу считается работа Г. Канна «Эскалация надежности; метафоры и сценарии» [492].

В настоящее время понятие сценария в теории организационного управления используется уже достаточно широко. В зарубежной и отечествен-

ной литературе можно выделить два базовых подхода к определению сценария [29; 48; 317; 353].

В рамках первого в определении сценария делается акцент на причинно-факторную детерминированность последовательного развития исследуемой проблемной ситуации. Согласно представлениям Г. Канна, сущность сценарного подхода заключается в выделении базовых количественных и качественных показателей, описывающих характер развития исследуемой ситуации, при этом экстраполяция средних значений факторов формирует базовый сценарий, а их вариации и отклонения, а также тенденции изменения во времени образуют негативные или позитивные альтернативные сценарии [29]. В работе Л. Ганна и Б. Хогвуда сценарий рассматривается как «гипотетическая последовательность событий, конструируемая в целях фокусирования внимания на причинных процессах и решениях» [478]. Аналогичное развернутое определение сценария дается В. Н. Цыгичко и Д. С. Черешкиным, в рамках которого сценарий понимается как «гипотетическая картина последовательного развития во времени и пространстве событий, составляющих в совокупности эволюцию социально-экономического объекта в интересующем исследователя разрезе. В сценарии в явном виде фиксируются причинно-следственные зависимости, определяющие возможную в будущем динамику изменения состояния объекта и условия, в которых эти изменения будут происходить» [361].

Второй подход предполагает использование в качестве цели разработки сценария не предвосхищение альтернатив развития ситуации, а прежде всего установление логической сети последовательности свершения событий, определяющих пути ее развития [15; 23; 187]. В соответствии с определением Г. Канна и Э. Винера сценарий представляет собой «динамическую последовательность возможных событий, фокусирующую внимание на причинно-следственной связи между этими событиями и точками принятия решений, способных изменить их ход и траекторию движения во времени всей рассматриваемой системы в целом или отдельных ее подсистем» [493].

В теории организационного управления в настоящее время сценарий преимущественно рассматривается как инструмент анализа альтернативных вариантов развития объекта управления и ситуации во внешней среде с учетом их взаимовлияния с целью поддержки процессов подготовки и принятия управленческих решений, а также опережающей оценки их эффективности [135; 378; 379]. Укрупненная классификация сценариев развития проблемных ситуаций представлена в табл. 2.4.1.

Таблица 2.4.1. Укрупненная классификация сценариев

| № | Признак классификации   | Наименование сценариев       | Описание  |
|---|---|------------------------------|---|
| 1 | Тип вероятностных оценок событий                                  | Базовые (наиболее вероятные) | Предназначены для глубокого и тщательного анализа наиболее вероятных (ожидаемых) тенденций изменения обстановки с целью выявления возможных и целесообразных направлений развития объекта управления  |
|   |   | Пессимистические             | Представляют собой набор событий и взаимосвязей между ними, которые приводят к максимальным потерям и ущербу в результате их возникновения и развития   |
|   |   | Оптимистические              | Отражают события и взаимосвязи между ними, которые приводят к наиболее позитивным с точки зрения целей управления результатам и тенденциям в развитии ситуации на объекте управления и во внешней среде   |
| 2 | Масштаб охвата событий, связанных с развитием проблемной ситуации | Локальные                    | Строятся применительно к отдельным процессам и явлениям с учетом конкретных условий их возникновения, развития и взаимодействия объекта управления с внешней средой, а также альтернативных направлений развития исследуемой ситуации   |
|   |   | Групповые (межгрупповые)     | Разрабатываются применительно к отдельно выбранной группе процессов, явлений или событий. На основе анализа таких сценариев развития ситуации решаются в основном тактические задачи управления   |
|   |   | Глобальные                   | Описывают последствия реализации взаимосвязанной совокупности событий, явлений и факторов, характеризующих исследуемую ситуацию в управляемой системе и во внешней среде в целом  |
| 3 | Базовые этапы управленческого цикла                               | Нормативно-целевые           | Предназначены для оценки достижимости поставленных стратегических и тактических целей управления и желаемых значений ключевых (нормативных, целевых и т. д.) показателей эффективности процессов их достижения, а также анализа критичности ресурсно-временных ограничений на заданном временном горизонте. Эффективность и область их практического использования может быть существенно расширена в сочетании с другими типами сценариев  |
|   |   | Стратегические               | Основной задачей сценариев является комплексный многофакторный опережающий анализ эффективности стратегических управленческих решений на длительном временном горизонте в условиях риска и неопределенности. Сценарии этого типа должны охватывать значительное множество альтернатив возможного развития событий, включать широкую совокупность качественных и количественных параметров и оценочных показателей, а также учитывать большое число взаимозависимостей и взаимосвязей между ними |

| № | Признак классификации | Наименование сценариев     | Описание  |
|---|-----------------------|----------------------------|---|
|   |                       | Оперативные                | Сценарии данного типа разрабатываются в качестве реакции на происходящие события или внезапно возникшие непредвиденные риски и угрозы и предназначены для оценки непосредственного влияния конкретных как неблагоприятных, так и, наоборот, благоприятных и открывающих новые возможности событий, требующих принятия тактических или корректировки стратегических решений по управлению развитием ситуации   |
|   |                       | Упреждающие мониторинговые | Главной задачей является опережающая оценка характера, закономерностей и динамики развития исследуемой ситуации на основе данных мониторинга, а также выявление на их основе возможности появления неблагоприятных тенденций изменения обстановки с целью осуществления упреждающей реакции на них системы управления. Сценарии данного типа обеспечивают возможность функционирования системы управления в проактивном режиме, предполагающем принятие превентивных мер по снижению возможных рисков и предотвращению потенциальных проблем в процессе достижения целей управления до их фактического возникновения или проявления |

Областью наиболее эффективного применения сценарного подхода в организационном управлении при планировании и реализации военных и специальных мероприятий являются ситуации, когда по целому ряду объективных причин полноценное использование строгих и в том числе хорошо зарекомендовавших себя при решении прикладных управленческих задач математических моделей невозможно. К таким причинам можно отнести:

- неполную наблюдаемость происходящих внешних и внутренних процессов на объекте управления и во внешней часто высококонкурентной среде проведения военных и специальных мероприятий;

- наличие множества военных, политических, дипломатических, экономических социальных, информационных и прочих аспектов, которые необходимо учитывать при принятии управленческих решений;

- необходимость координации совместных усилий при проведении комбинированных или комплексных военных и специальных операций, проводимых несколькими самостоятельными органами с образованием краткосрочных межвидовых (для различных видов вооруженных сил), межведомственных (для различных оперативных служб) или внутриведомственных (для различных структурных подразделений в рамках одного ведомства) органов управления;

- скрытный и труднопредсказуемый характер многих существующих и потенциальных угроз достижению целей управления;
- высокую сложность оценки тенденций возможного развития проблемных ситуаций на объекте управления и особенно во внешней среде;
- неполноту и зачастую недостаточную достоверность, а также запаздывание поступающей исходной информации о проблемной ситуации, значительную долю которой составляют качественные показатели, оценка которых представляет собой отдельную и достаточно сложную проблему;
- отсутствие возможности заблаговременно и достоверно предвидеть и оценить как позитивные результаты, так и возможные негативные последствия реализации решений, связанных с проведением военных и специальных мероприятий.

Для решения рассматриваемых задач предлагается использовать методологию, базирующуюся на использовании неполных математических моделей, т. е. моделей, в которые включены лишь существенные факторы, которые поддаются количественной или качественной оценке, а также могут быть формализованы с приемлемой степенью точности. Основной областью применения таких моделей является часто встречающийся в практике подготовки и проведения военных и специальных операций класс задач, сводящихся к нахождению как оптимистических, так и пессимистических опережающих (прогнозных) оценок основных количественных и качественных характеристик исследуемых проблемных ситуаций или объектов в условиях реализации определенной совокупности управленческих решений. Данный подход позволяет вырабатывать интегрированные стратегии управления, обеспечивающие существенное снижение рисковых составляющих вне зависимости от реального развития событий в будущем.

Одним из ключевых понятий методологии сценарного подхода является *неопределенность*, под которой понимают наличие фактора случайности или недостатка знаний о возможных путях развития обстановки, вследствие чего не представляется возможным достоверно оценить ожидаемые результаты и возможные последствия принимаемых решений. Укрупненная типология неопределенности представлена на рис. 2.4.1 [135; 415; 519].

Вследствие многогранности факторов неопределенности методология ее оценки в настоящее время развивается в основном в направлении разработки методов решения достаточно «узких», т. е. ограниченных рамками выбранных сегментов исследуемых предметных областей прикладных задач. При этом для решения рассматриваемых проблем используется широкий арсенал различных

подходов, а также применяются разнообразные классы различающихся по методам формализованного описания свойств и характеристик неопределенности математических моделей: классические вероятностно-статистические, стохастические, нечетко-множественные, игровые, экспертные и т. д.



Рис. 2.4.1. Классификация основных видов неопределенности

С точки зрения обеспечения проведения военных и специальных мероприятий управление, ведущее к снижению неопределенности, должно преобразовывать множество состояний таким образом, чтобы вероятности попадания объекта управления в одно из нежелательных состояний уменьшались, а в желательные (целевые или безопасные) – наоборот, увеличивались. Сценарный подход при этом направлен на:

– выявление как возможностей, так и угроз связанных с реализацией целей военных и специальных мероприятий, при этом сценарный подход рассматривает управление со стороны всех субъектов, как действующих совместно, так и конфликтующих;

– дополнение имеющейся неполной информации об обстановке прогнозными данными качественного характера о возможных событиях и последствиях реализации управленческих решений.

Таким образом, построение сценариев преследует две цели в отношении неопределенности: во-первых, максимально возможное в рамках данного подхода ее снижение; во-вторых, описание неустранимой части неопределенности с помощью ряда сценарных вариантов. Тем самым закладывается основа для последующего снижения уровня неопределенности развития объекта управления и влияния внешней среды применительно к процессам поиска наилучших решений возникших проблем.

В процессах организационного управления можно выделить четыре базовых уровня неопределенности [162; 183; 345].

*Уровень 1.* Низкий, характеризующийся возможностью достаточно точно прогнозировать развитие ситуации в будущем и, как следствие, практически не влияющий на типовые процедуры планирования и управления, поскольку на данном уровне неопределенность не оказывает существенного влияния на качество принимаемых решений и может быть существенно снижена применением достаточно широкого инструментария разработки точных прогнозов. В практике решения управленческих задач подобная ситуация является «идеальной» и встречается крайне редко.

*Уровень 2.* Средний, требующий дополнения традиционных подходов и процедур планирования и управления сценарными технологиями анализа альтернативных вариантов будущего. На данном уровне разрабатывается ограниченное множество альтернативных прогнозных сценариев (на практике – два-три, а в отдельных случаях возможно и несколько больше), из которых в результате анализа выбирается один, преимущественно – наиболее вероятный, оптимистический или пессимистический. Данный уровень характерен для довольно «узких» практических задач, когда у субъекта управления имеется минимально необходимый, но при этом достаточный объем исходной информации, позволяющий достоверно прогнозировать альтернативы в развитии исследуемой ситуации, а решение фактически определяется выбранным сценарием. При этом синтезируются в основные синергические сценарии (без вмешательства извне или при применении ограниченного множества

задаваемых локальных управляющих воздействий), основной целью которых является выявление базовых тенденций развития управляемой системы и оценки значимости угроз процессам достижения целей управления (рис. 2.4.2).

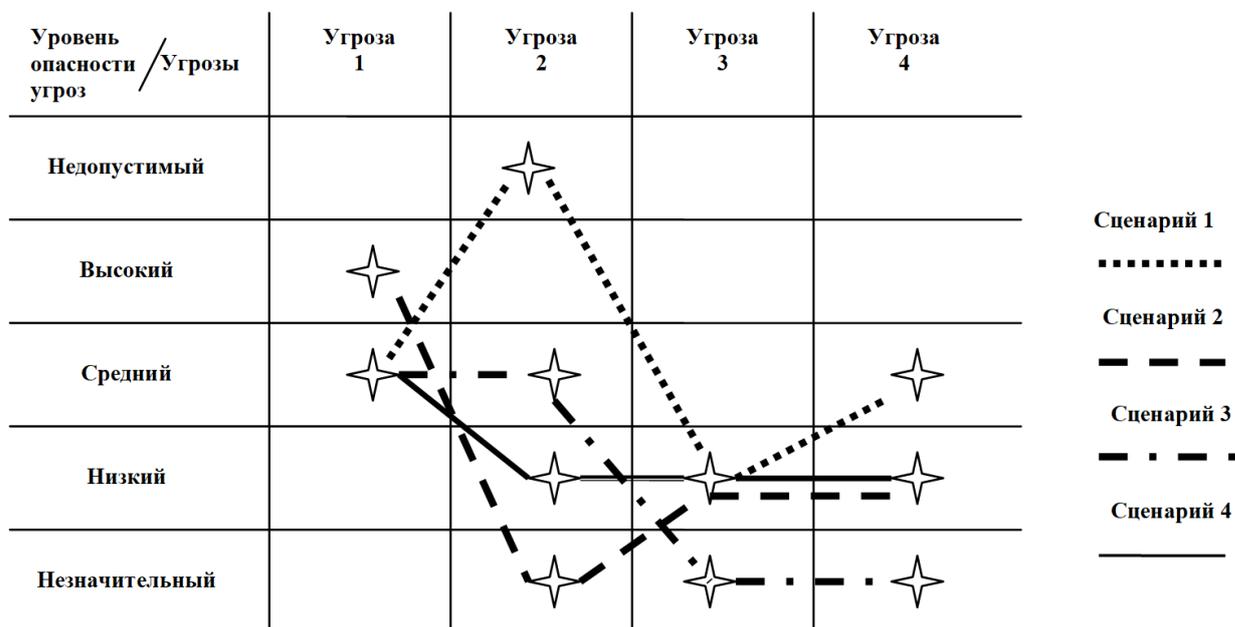
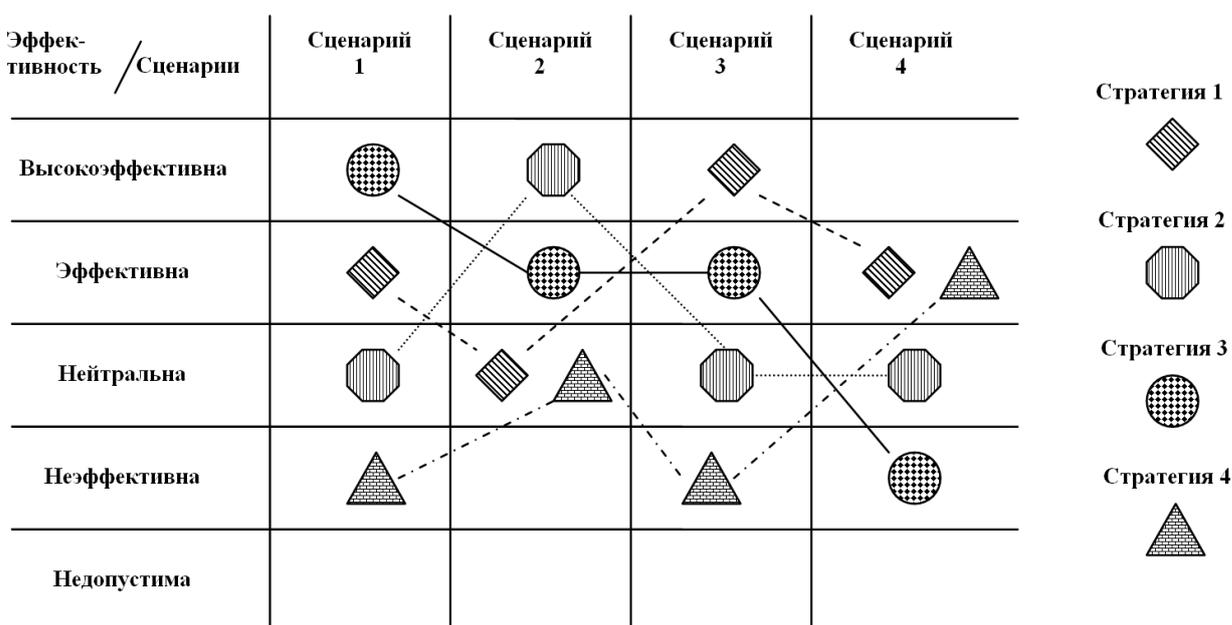


Рис. 2.4.2. Принципиальная схема сценарного анализа угроз

**Уровень 3.** Высокий, требующий использования практически всего спектра возможностей сценарного подхода при выработке управленческих решений. Подобные ситуации встречаются наиболее часто при решении стратегических задач и характеризуется широким набором количественных и качественных параметров, а также высокой сложностью их взаимосвязей. Рассматриваемый уровень неопределенности характерен для принципиально новых, а также крупномасштабных и долгосрочных стратегических задач. В силу крайне слабой предсказуемости характера развития исследуемой ситуации особенно на длительном временном горизонте, для ее анализа требуется разработка аттрактивных сценариев (с учетом выбранного комплекса управляющих воздействий). При этом существенно возрастает сложность получения полного сценарно-прогнозного спектра оценок возможных результатов реализации разрабатываемых решений (рис. 2.4.3).

**Уровень 4.** Сверхвысокий, во многом находящийся за границами понимания специалистов, экспертов, и лиц, принимающих решения (ЛПР) и вследствие этого требующий дополнительных и глубоких аналитических исследований предметной области. Данный уровень представляет собой противоположную первому уровню крайность и достаточно редко встречается

в практике организационного управления. В рассматриваемой ситуации неопределенность настолько многомерна, что какие-либо характеристики исследуемой ситуации практически не поддаются прогнозированию или предвидению. Более того, крайне затруднительно и четко сформулировать цели управления, а также оценить имеющиеся ограничения, в результате чего попытки разработки эффективных решений многократно усложняются. В подобной ситуации единственным выходом является применение на первом этапе методов комплексного и достаточно длительного исследования рассматриваемой предметной области на мультидисциплинарной основе с целью «смещения» рассматриваемой задачи в сторону третьего или, если такое окажется возможным, второго уровня.



*Рис. 2.4.3. Принципиальная схема сценарного анализа эффективности стратегических решений*

### **2.4.1. Сценарное моделирование процессов управления**

В настоящее время абсолютное большинство используемых методов построения сценариев опирается, во-первых, преимущественно только на экспертные методы их формирования; во-вторых, на специфику конкретной и в основном строго ограниченной области исследования, на основе результатов анализа которой разрабатываются отражающие данные особенности узкоспециализированные формализованные модели на базе разнообразного математического аппарата; в-третьих, разработка альтернативных сценариев и

их анализ осуществляется экспертами и профильными специалистами в основном «вручную». Последнее является одним из основных препятствий для расширения возможностей эффективного применения рассматриваемого подхода для решения широкого круга прикладных задач организационного управления, поскольку «ручная» разработка сценариев является достаточно дорогостоящей и требует значительных временных затрат, в результате чего зачастую решения принимаются на основе единственного базового сценария.

Решение данной проблемы заключается в разработке и использовании средств автоматизации сценарного анализа с целью информационной поддержки процессов подготовки и принятия управленческих решений, а также опережающей оценки их эффективности.

Одним из подходов к формализации сценарных исследований является использование в качестве методологической основы математического аппарата знаковых, взвешенных знаковых и функциональных ориентированных графов, который является расширением классической графовой модели: кроме орграфа  $G(X, E)$ , где  $X$  – конечное множество вершин, а  $E$  – множество дуг графа, в модель включаются дополнительные компоненты [135; 378]. В частности, вводится множество параметров вершин

$$V = \{v_i, i \leq N = \|X\|\}.$$

Каждой вершине  $x_i$  ставится в соответствие ее параметр  $v_i \in V$ . Вводится также функционал преобразования дуг  $F(V, E)$ , т. е. в соответствие каждой дуге ставится либо знак, либо вес, либо функция.

Если функционал имеет вид:

$$F(v_i, v_j, e_{ij}) = \begin{cases} +1, & \text{если рост (падение) } v_i \text{ вызывает} \\ & \text{рост (падение) } v_j, \\ -1, & \text{если рост (падение) } v_i \text{ вызывает} \\ & \text{падение (рост) } v_j, \end{cases}$$

то такая модель называется *знаковым орграфом*.

Если функционал имеет вид:

$$F(v_i, v_j, e_{ij}) = \begin{cases} +W_{ij}, & \text{если рост (падение) } v_i \text{ вызывает} \\ & \text{рост (падение) } v_j, \\ -W_{ij}, & \text{если рост (падение) } v_i \text{ вызывает} \\ & \text{падение (рост) } v_j, \end{cases}$$

то такая модель называется *взвешенным знаковым орграфом* (здесь  $W_{ij}$  является весом соответствующей дуги).

Если функция имеет вид:

$$F(v_i, v_j, e_{ij}) = f_{ij}(v_i, v_j),$$

то такая модель называется *функциональным орграфом*.

На расширенных таким образом орграфах вводится понятие импульса и импульсного процесса в дискретном временном пространстве. Импульсом  $P_i(n)$  в вершине  $x_i$  в момент времени  $n \in N$  называется изменение параметра в этой вершине в момент времени  $n$ :

$$P_i(n) = v_i(n) - v_i(n - 1).$$

Значение параметра в вершине  $x$  определяется соотношением:

$$v_i(n) = v_i(n - 1) + \sum_{j=1, j \neq i}^N F(v_i, v_j, e_{ij}) P_j(n - 1) + P_i^0(n).$$

Здесь  $P_i^0(n)$  — внешний импульс, вносимый в вершину  $e_i$  в момент времени  $n$ . Из двух последних конечно-разностных уравнений легко получить уравнение для импульса в исследуемом процессе:

$$P_i(n) = \sum_{j=1, j \neq i}^N F(v_i, v_j, e_{ij}) (P_j(n - 1) + P_i^0(n)).$$

Сценарная модель, таким образом, представляет собой ориентированный граф, в котором каждой вершине ставится в соответствие некоторый ее параметр, а также вводится функционал преобразования дуг, т. е. в соответствие каждой дуге ставится знак, вес или функция. С целью обеспечения возможности исследования динамики процессов развития исследуемой ситуации вводится понятие импульсного процесса. Под импульсом в некоторой вершине понимается изменение значения ее параметра в дискретный момент времени.

Содержательно параметрами вершин графа являются ключевые показатели (факторы), описывающие состояние и динамику развития исследуемой ситуации, структура знакового графа отражает их причинно-следственные взаимозависимости. Совокупность значений параметров вершин в графовой модели описывает конкретное состояние исследуемой ситуации в определенный момент времени, при этом изменение любого из них порождает импульс. Управляющие воздействия моделируются подаваемыми импульсами в вершины графа или изменением структуры модели.

Приведенные выше выражения иллюстрируют принципы построения системы имитационного моделирования, т. е. математическую основу, на которой разработаны алгоритмы расчета значений параметров вершин и величины входящих и исходящих импульсов (которые определяются только в процессе имитационного моделирования). Формализованная методология имитационного моделирования на базе аппарата функциональных графов детально рассмотрена в [135].

Проиллюстрируем сущность процессов сценарного моделирования на наиболее наглядных примерах, взятых из ряда смежных предметных областей. На рис. 2.4.4 приведен фрагмент модели управления спецоперацией по освобождению захваченного террористами здания, основой которой является нечеткий граф, ребра которого не только отражают причинно-следственные связи между факторами, но и определяют степень влияния (вес) связываемых факторов.

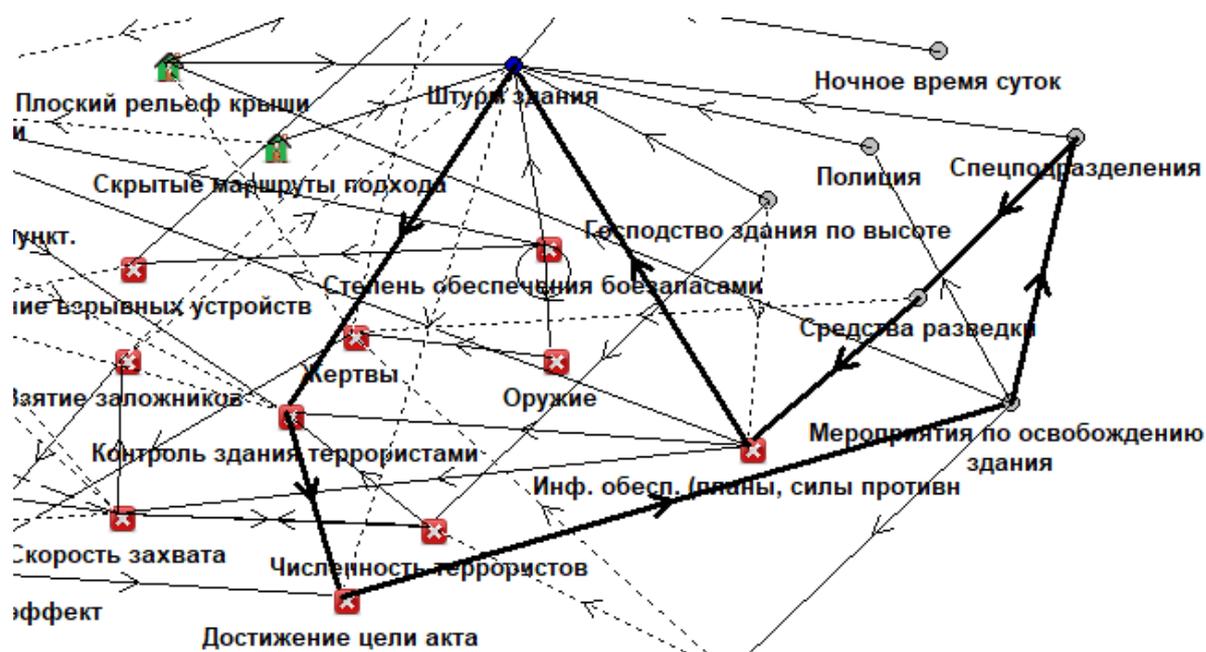


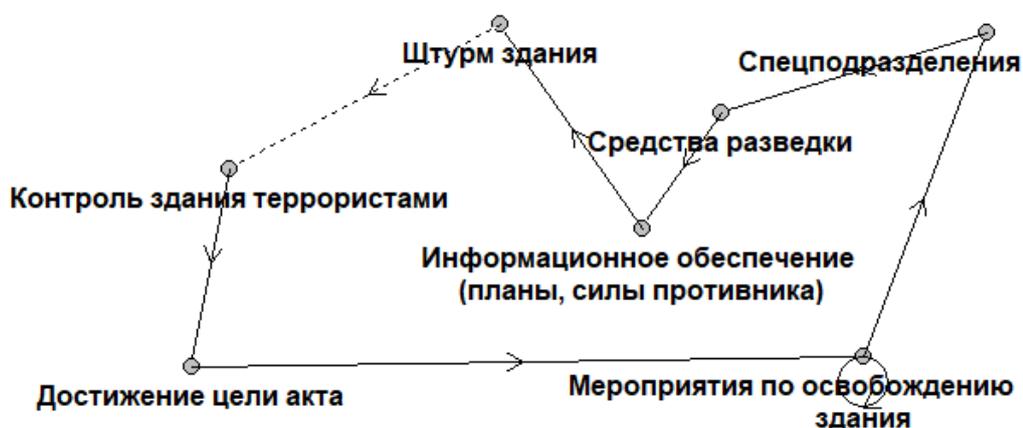
Рис. 2.4.4. Фрагмент модели освобождения захваченного террористами здания

Дуги графа, представленные штриховыми линиями, имеют отрицательный знак и означают ослабляющее влияние одного фактора на другой, дуги, обозначаемые непрерывными линиями – положительный, означающий усиление данного влияния, которое соответствующим образом изменяет значение параметра конечной вершины при прохождении импульса по рассматриваемой дуге.

На рис. 2.4.5 из представленного на рисунке 2.4.4 фрагмента выделен отдельный цикл графовой модели, в котором отражены следующие причинно-следственные связи:

- рост степени достижения цели террористического акта должен приводить к росту интенсивности мероприятий по освобождению захваченного здания;
- мероприятия проводятся постоянно, до полного освобождения здания (круговая дуга);

- к проведению мероприятий по освобождению захваченного здания привлекаются специальные подразделения;
- использование специальными подразделениями средств разведки приводит к повышению качества информационного обеспечения мероприятий с точки зрения планов и сил противника;
- полученная информация положительно влияет на успешность штурма здания с целью его освобождения;
- успех штурма здания ведет к потере контроля над зданием со стороны террористов;
- достижение цели террористического акта связано с осуществлением контроля над зданием террористами.



*Рис. 2.4.5. Структура выделенного цикла модели*

Таким образом, использование аппарата знаковых, взвешенных и функциональных графов в сценарном анализе позволяет:

- осуществлять моделирование и анализ не поддающихся строгой формализации проблем, для решения которых применение точных методов крайне затруднено в силу неполноты, недостаточной достоверности и запаздывания поступающей исходной информации, а также необходимости обработки разнородных по своей природе количественных и качественных исходных данных, субъективных суждений и выводов экспертов и т. д.;
- использовать «отчуждение» экспертных знаний от их носителей, так как эти знания уже заложены в модель и могут многократно использоваться в ситуациях, когда необходимые эксперты недоступны или при жестких ограничениях на время анализа ситуации или принятия решения;
- формировать модели развития обстановки на качественном уровне, в которые в условиях неполной наблюдаемости исследуемых ситуаций включены лишь наиболее существенные факторы и причинно-следственные связи между ними;

– исследовать структуру полученной сценарной модели в том числе существующими хорошо разработанными методами теории графов с целью формирования новых знаний о развитии ситуации, уязвимости объекта управления, а также рисков и возможностей достижения цели управления в условиях неопределенности;

– формировать спектр альтернативных сценариев развития ситуации при различных условиях, а также проводить целевой прогноз поведения как самого объекта управления, так и его окружения (внешней среды);

– осуществлять на основе результатов моделирования оценку эффективности и согласованности множества распределенных во времени и пространстве стратегических и тактических управленческих решений по достижению поставленных целей в условиях неопределенности.

Рассматриваемые модели и методы сценарного исследования являются развитием математического аппарата когнитивных карт. Язык когнитивных карт и соответствующий аппарат их анализа и моделирования впервые появился в работах коллектива авторов, вышедших в виде книги «Structure of Decision» под редакцией Ф. Аксельрода [563] в 60-х годах XX века. В публикуемых исследовательских материалах RAND Corporation, реализующих исследования в интересах армии Соединенных Штатов и НАТО, модели на основе когнитивных карт применяются для постановки и решения различных стратегических задач. Косвенно можно сделать вывод о том, что модели на когнитивных картах и методы их анализа применяются при формировании военных и геополитических стратегий в США.

В качестве одного из характерных примеров применения языка когнитивных карт для моделирования сложных ситуаций можно привести заметку в журнале The NewYorkTimes «We Have Met the Enemy and He Is PowerPoint»<sup>1</sup> от 26 апреля 2010 г., в которой была опубликована диаграмма обратных связей, отображающая стратегию США в Афганистане:

См. <https://www.nytimes.com/2010/04/27/world/27powerpoint.html>

*Рис. 2.4.6. Когнитивная карта американской стратегии в Афганистане*

В качестве еще одного примера подобного подхода можно привести фрагмент модели развития ситуации на Ближнем Востоке (рис. 2.4.7).

---

<sup>1</sup> *We Have Met the Enemy and He Is PowerPoint*: //The New York Times. 2010. April 26. – URL: <https://www.nytimes.com/2010/04/27/world/27powerpoint.html> (дата обращения: 02.07.24).

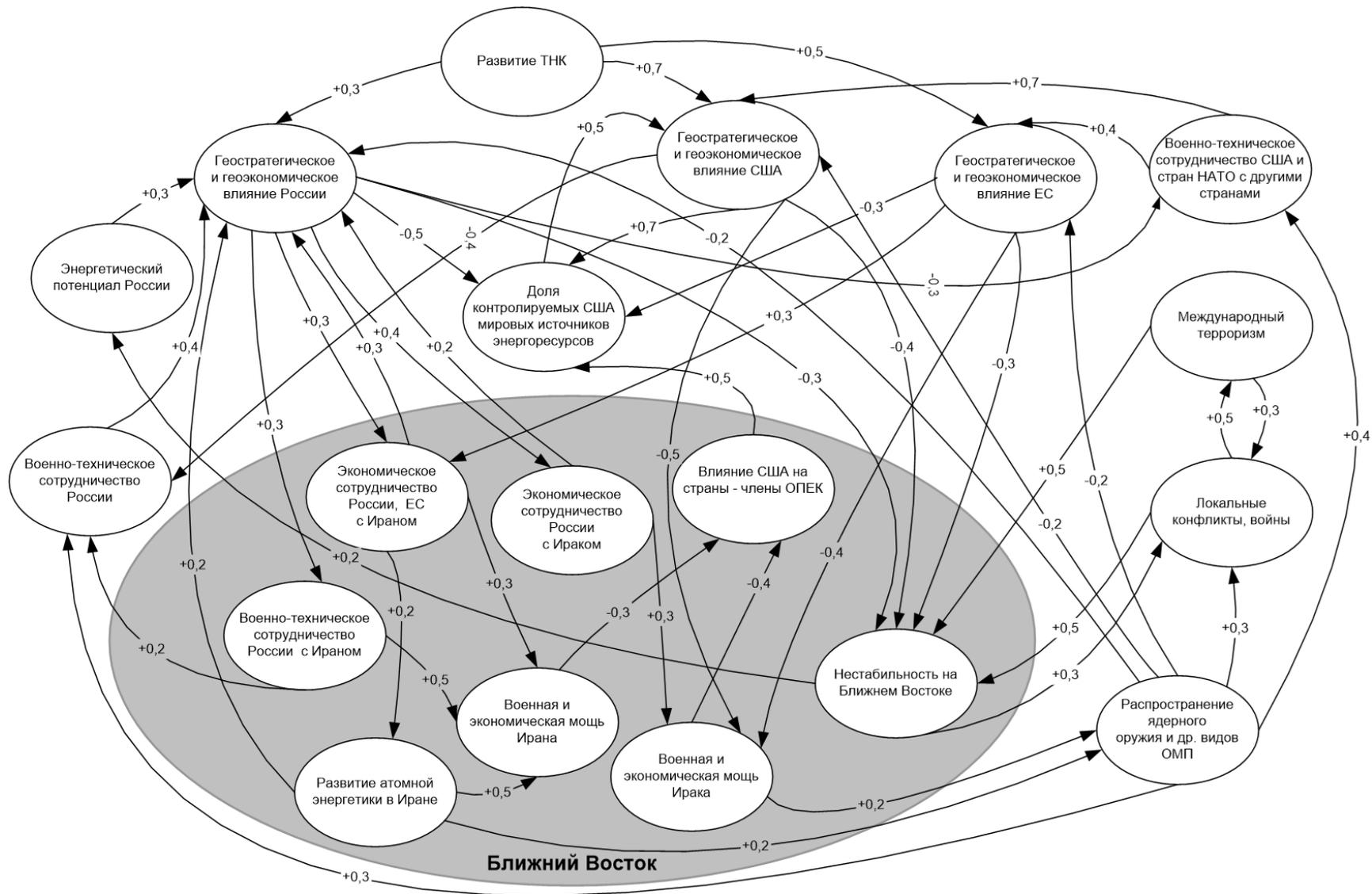


Рис. 2.4.7. Фрагмент модели развития ситуации на Ближнем Востоке

В отчете института RAND по моделированию, симуляции и операционном анализе в Афганистане и Ираке [443] приведены более сложные графовые модели стратегии командования США. В период с 2009 по 2012 год штабные офицеры на основе анализа количественной и качественной информации сформировали онтологическую модель, объединяющую разные типы моделей на основе языка описания причинно-следственных моделей. По мере накопления опыта работы с имеющимися данными и сложности обстановки они начали осознавать неприменимость традиционных подходов к оценке доктрины США и НАТО в условиях противодействия противнику. Для интеграции различных моделей в RAND была разработана модель кампании «иррегулярная война / противодействие повстанцам» на уровне театра военных действий, которая во многом отражает как стандартную доктрину оценки США, так и предложенный в 2009 году количественный подход к оценке ситуации в Афганистане [471]. Эта модель опирается на более чем 400 взаимозависимых онтологий.

Формирование сценарных моделей строится на основе выделения значимых факторов внутренней и внешней среды осуществления военных и специальных мероприятий. На начальном этапе построения сценарной модели необходимо собрать и структурировать данные, полученные от экспертов с применением некоторых инструментов анализа. В качестве основы можно для этих целей использовать результаты SWOT-анализа, ориентированного на выявление факторов внутренней и внешней среды и разделении их на четыре категории: сильные стороны, слабые стороны, возможности и угрозы (англ.: Weaknesses, Strengths, Opportunities, Threats соответственно). Возможно также применение более ориентированного на предметную область и расширяемого при необходимости новыми аспектами PEST-анализа, предназначенного для выявления политических, экономических, социальных и технологических аспектов внешней среды (англ.: Political, Economic, Social, Technological соответственно), которые влияют на достижение целей управления.

На основе результатов такого предварительного анализа заполняется паспорт проблемной ситуации (ПС) в виде специальной формы, аккумулирующей всю информацию об объектах и субъектах управления, их возможностях и рисках, и в конечном итоге о факторах и связях между ними. В качестве объекта управления рассматривается или организационная система или конкретная ситуация. В качестве факторов объекта управления выделяются следующие:

1) Входные факторы, на которые могут оказывать воздействие извне. Эта часть объекта управления образована совокупностью факторов, непосред-

ственной причиной изменения значений каждого из которых является соответствующие ему и предназначенные для этого управляющие воздействия. Входные факторы отражают «открытость» объекта управления воздействиям со стороны субъектов управления, реализующих собственные в том числе и конкурирующие цели.

2) Факторы внутренней структуры, определяющие внутренние технологии функционирования объекта, внутренние материальные, информационные и иные потоки.

3) Выходные факторы, которые определяют функциональность объекта и могут оказывать воздействия на другие объекты или ситуации. Эта часть образована совокупностью факторов, все или отдельные комбинации значений которых рассматриваются в качестве целевых состояний управляемой системы (объекта управления), в которых она способна самостоятельно выполнять предписанные функции или влиять на достижение целей субъектов управления.

Базовая структура паспорта ПС представлена на рис. 2.4.8. Конкретная структура определяется спецификой решаемых задач.

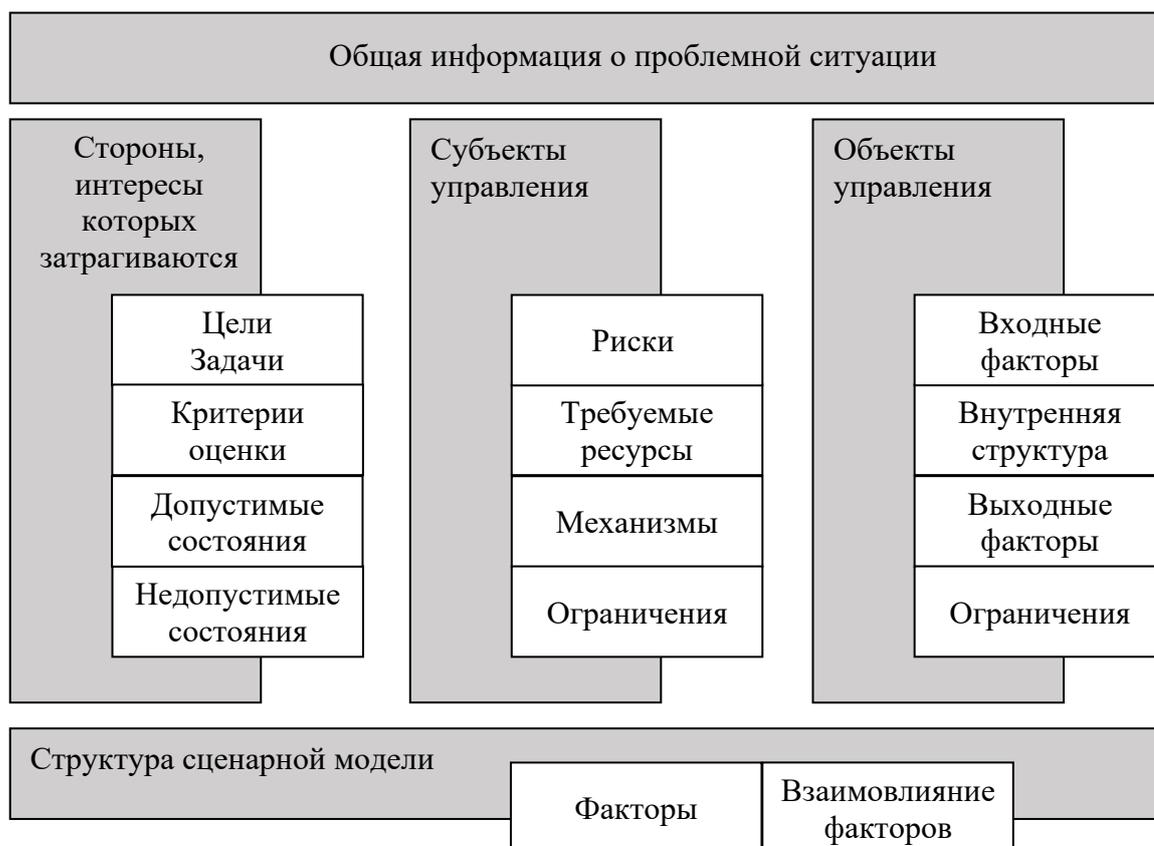


Рис. 2.4.8. Структура паспорта проблемной ситуации

Общая информация по ПС, в которой формулируется проблема и определяются ее границы, является входной для рассматриваемой проблемы и заполняется до передачи материалов экспертам.

Формулировка проблемы – изложение содержания теоретического или практического вопроса, требующего изучения и разрешения.

Границы проблемы:

– выделение объекта или объектов (если несколько сторон затрагивает проблема),

– краткое описание обстановки, ситуации,

– пространственные, временные и внутрисистемные границы проблемы.

Пространственные границы определяются территорией, на которой возникла проблема. Четкое определение пространственных границ проблемы важно главным образом в международных отношениях, так как тесно связано с проблемой притязаний сторон.

Временные границы проблемы – это продолжительность от возникновения проблемы до ее возможного разрешения.

Внутрисистемные границы определяются исходя из того, что любая проблема возникает в конкретной системе – регионе, государстве, международном сообществе и т. д.

Технически паспорт ПС представляет собой базу данных накапливаемой и изменяемой информации о существующих и новых ситуациях в сфере реализации военных и специальных мероприятий, в которой отражается вся необходимая для сценарного исследования информация.

На конечных этапах формирования паспорта ПС разрабатывается сценарная модель в виде совокупности факторов и взаимосвязей между ними.

Аппарат теории графов и теории отношений является эффективным инструментом для анализа проблем вариантности и может быть использован для построения и анализа множества альтернатив развития ситуации в той или иной предметной области. При этом инструментарий теории графов и теории отношений удобен также тем, что он непосредственно может быть представлен с помощью операций над матрицами и переложен на язык вычислительных алгоритмов и схем.

Для решения задач информационно-аналитической поддержки процессов подготовки, принятия и оценки эффективности управленческих решений в условиях неопределенности на базе аппарата функциональных графов в Институте проблем управления РАН разработан специализированный программно-аналитический комплекс [135]. Формируемая с использованием

средств автоматизации сценарная модель представляет собой интеграцию знаний экспертов в «профильных» для решаемой проблемы предметных областях. Исследование же рассматриваемой модели способствует приобретению новых знаний (как синергического эффекта от реализации процессов сценарного анализа исследуемых ситуаций на междисциплинарной основе), использование которых способно выявить новые возможности для повышения эффективности и результативности принимаемых решений.

Использование технологий автоматизации сценарно-прогнозных исследований в качестве средств информационной поддержки процессов подготовки и принятия решений существенно расширяет возможности использования сценарного подхода как основы для решения задач планирования и управления с целью повышения обоснованности, эффективности, устойчивости и результативности разрабатываемых решений.

Технология автоматизации процессов синтеза сценариев позволяет практически на любом этапе управленческого цикла использовать полный набор различных необходимых для принятия решений сценарных инструментов, а также проводить уточняющие сценарно-прогнозные исследования эффективности принимаемых решений с учетом как полученных в процессе анализа новых знаний об исследуемых процессах и явлениях, так и поступающей в систему управления оперативной информации об их развитии.

#### ***2.4.2. Пример применения сценарного моделирования для анализа влияния глобальных процессов внешней среды на факторы национальной безопасности***

Проиллюстрируем возможности использования сценарного подхода для решения задач долгосрочного сценарного прогнозирования и анализа геополитических угроз национальной безопасности России и оценки тяжести последствий, реализуемой странами Запада макроэкономической и финансовой политики в отношении нашей страны на кратком примере.

С целью оценки реальных возможностей использования сценарного подхода в управлении проведем ретроспективный анализ негативных последствий для России принятого в 1990-е годы стратегического решения о следовании принципам и положениям Вашингтонского консенсуса.

Базовые идеи Вашингтонского консенсуса впервые были изложены в работе британского экономиста Дж. Уильямсона «Перестройка Латинской Америки: что произошло?» [509], в которой автором проведен анализ

результатов реализации рекомендаций, предлагавшихся МВФ в 1980-е годы латиноамериканским странам. Данные рекомендации впоследствии и стали обозначать единым термином «Вашингтонский консенсус» [164].

Основные положения и аргументация «Вашингтонского консенсуса» заключаются в следующем:

- макроэкономическая стабильность: важность поддержания низких темпов инфляции, финансовой дисциплины и сбалансированного бюджета;
- либерализация торговли: поощрение стран к устранению барьеров в международной торговле путем снижения тарифов и квот, а также содействие экспортноориентированному росту экономики;
- дерегулирование: всемерная пропаганда устранения ненужных правил и бюрократических барьеров для повышения эффективности рынка и развития конкуренции;
- приватизация: поощрение передачи государственных предприятий в частный сектор для повышения их эффективности, гибкости и производительности;
- финансовая либерализация: содействие глобализации финансовых рынков и поощрение иностранных инвестиций и потоков капитала;
- права собственности: усиление механизмов защиты прав собственности для обеспечения благоприятного инвестиционного климата как в рамках действующего законодательства, так и практики правоприменения.

Вашингтонский консенсус, таким образом, представляет собой набор политических и экономических рекомендаций для развивающихся стран, предложенных МВФ, Всемирным банком и согласованных с Министерством финансов США в конце 1980-х и начале 1990-х годов. Несмотря на изначальную адресность этих рекомендаций, они со временем стали представлять собой основанную на мягкой силе целостную идеологию, реализуемую в зарубежных странах. В этих условиях любое государство, чтобы получить некие преференции, наиболее часто реализуемые в форме кредитов, должно выполнить предъявляемые требования Вашингтонского консенсуса, в результате воплощения в жизнь которых оно сталкивается с целым рядом острых проблем и негативных явлений в национальной экономике и социальной сфере и фактически попадает в экономическую и политическую зависимость от США, что и является конечной целью данной имеющей глобальные масштабы политической и макроэкономической «специальной операции» по фактической колонизации развивающихся государств и стран третьего мира [168].

На основе результатов проведенного анализа влияния основных положений Вашингтонского консенсуса на суверенитет Российской Федерации разработана сценарная модель, структура которой представлена на рис. 2.4.9. Модель разработана с использованием программно-аналитического комплекса сценарного моделирования на базе аппарата функциональных графов.

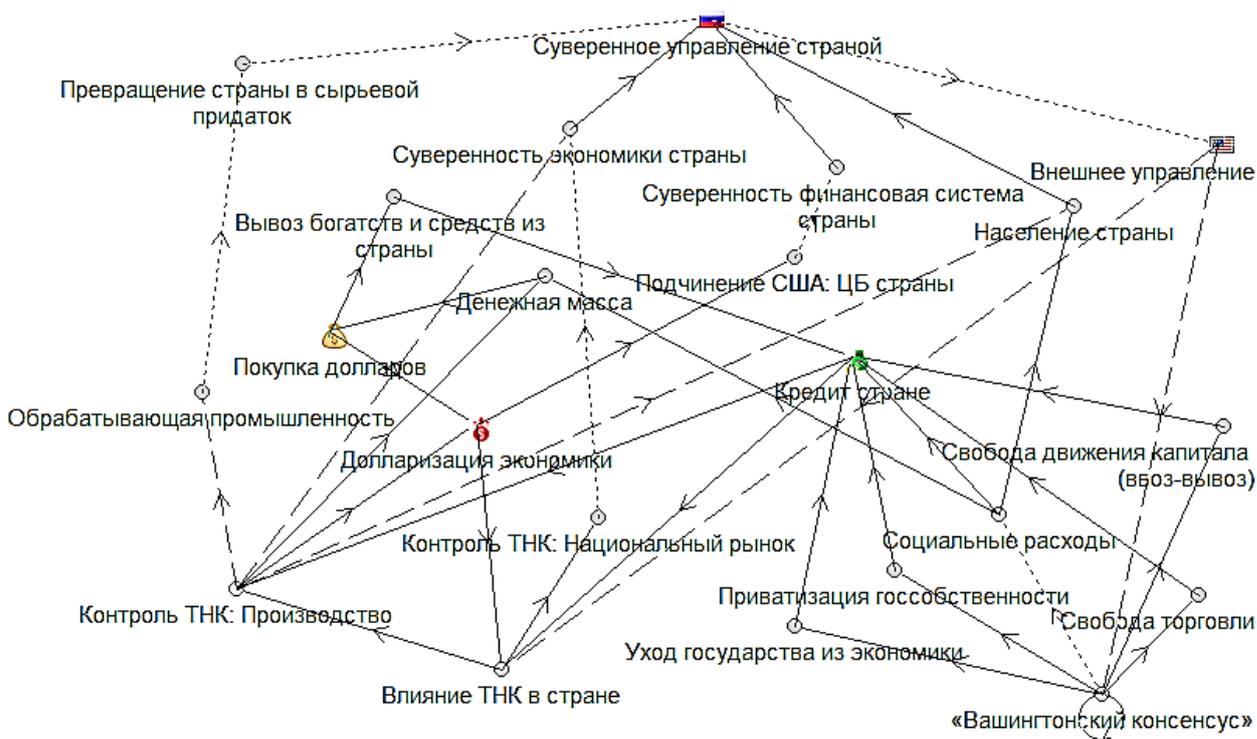


Рис. 2.4.9. Структура сценарной модели

Проведенный анализ структуры модели показал, что наибольшее число циклов проходит через целевой фактор – вершину «Суверенное управление страной». Данные циклы (нечетные и с функциональными взаимосвязями) отражают деструктивный характер влияния рассматриваемых процессов на данный фактор.

Фактор «Вашингтонский консенсус» включен в меньшее число потенциально деструктивных циклов. Из этого можно сделать вывод о том, что внутри структуры обеспечения государственного суверенитета заложены запускаемые извне деструктивные циклы, и, как результат, без внесенных уязвимостей их активация в рамках развития негативного сценария затруднительна. Такое положение способно стать базой и «локомотивом» информационной операции, в основе которой лежит утверждение, заключающееся в том, что западные «рецепты» для экономики в целом, положительны, но имеющиеся недостатки в стране не позволили им переломить ситуацию в положительную сторону. Проведение подобных информационных операций способно еще более усугубить деструктивные тенденции в развитии ситуации

(данные операции в процессе моделирования в дальнейшем не рассматриваются).

Проведем сценарное исследование рассматриваемых процессов и поэтапный анализ сгенерированного сценария.

*Этап 1.* На данном этапе активен контур воздействия, отвечающий за рост внешнего кредитования страны (результаты моделирования представлены на рис. 2.4.10).

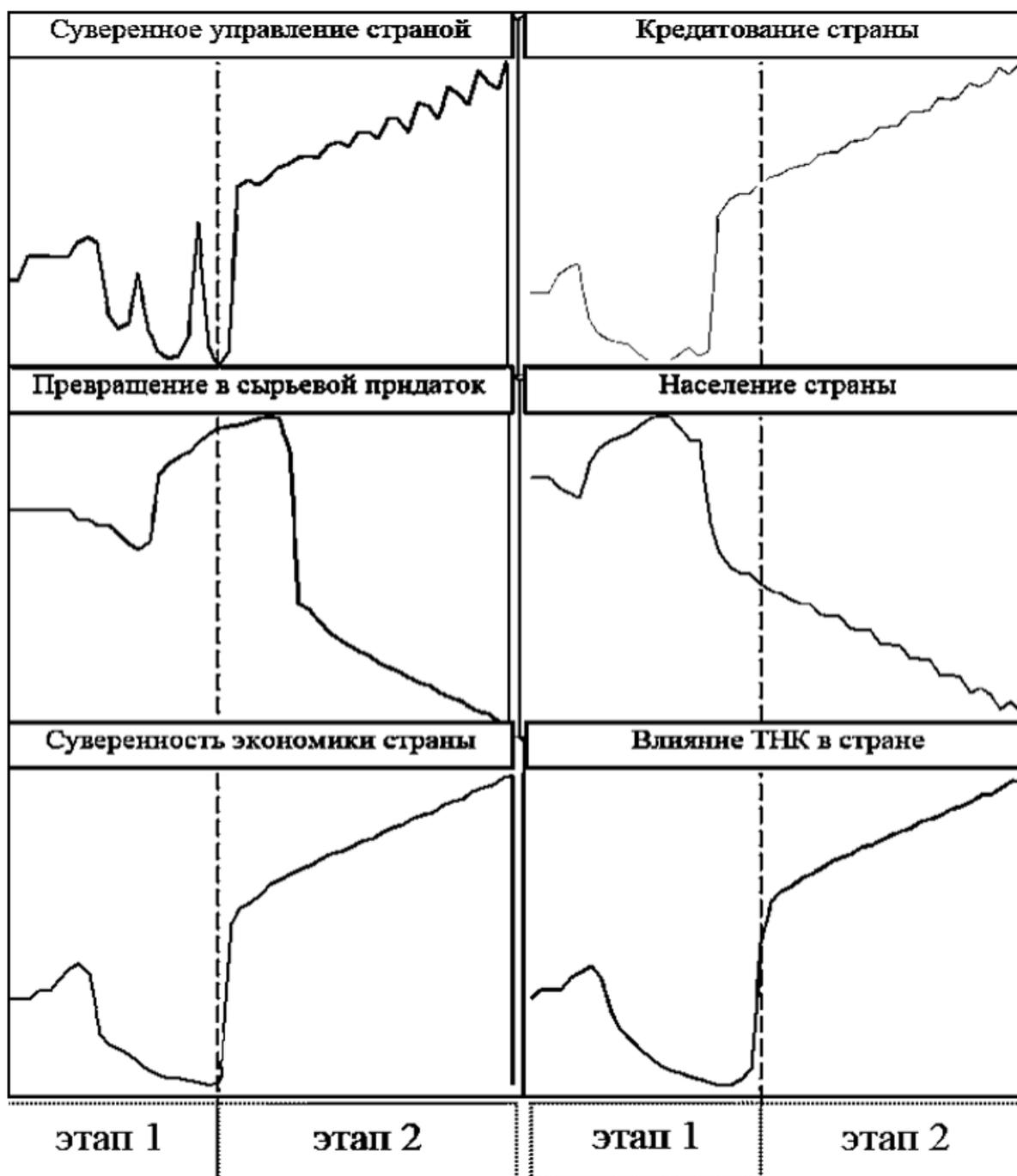


Рис. 2.4.10. Первый и второй этапы сценария

Здесь и далее на графиках по оси абсцисс отложено дискретное модельное время (в шагах моделирования), а по оси ординат – значение параметров вершин. Поскольку большинство графически отображаемых параметров исследуемой модели являются качественными, то генерируемые программно-аналитическим комплексом зависимости предназначены для оценки тренда изменения этих параметров (целевых факторов) при заданных внешних условиях: стабильное состояние, рост, падение, колебание резонанс и т. д. Это позволяет в рамках разрабатываемых сценариев делать выводы о целесообразности, преимуществах и недостатках моделируемых управленческих решений.

В рамках рассматриваемого сценария экономическая открытость приводит к тому, что под предлогом доступа к новым технологиям происходит сначала кратковременный всплеск влияния транснациональных компаний (ТНК) в стране. На этом этапе проникновению ТНК в экономику страны содействует определенный «вклад» данных корпораций в технологическое развитие отдельных подотраслей отечественной промышленности и связанный с этим определенный рост уровня жизни населения за счет насыщения рынка товаров и услуг. Одновременно с этим происходит усиление иностранного контроля над производственной деятельностью предприятий.

Затем фактор непосредственного влияния преследующих собственные корыстные цели ТНК «уходит в тень» и отражается только в последующем росте нестабильности, снижении суверенности экономики, а также в появлении негативных тенденций ухудшения ситуации в социальной сфере, в конечном итоге неизбежно приводящих к снижению уровня и качества жизни населения страны.

*Этап 2.* На втором этапе на фоне роста объемов внешнего кредитования наблюдается отчетливый рост влияния ТНК, которые, в свою очередь, по крайней мере статистически за счет размещения иностранных производств поддерживают определенный рост экономики страны (прежде всего – рост ВВП), а следовательно, в определенной мере способствуют хоть и неуверенному, но все же росту суверенности управления государством (рис. 2.4.10).

Однако данные положительные тенденции проявляются на фоне секвестирования социальных программ и связанного с ним неизбежного снижения уровня жизни населения. Наблюдается также в значительной мере имитация развития находящихся в зарубежной собственности «отверточных» предприятий обрабатывающей промышленности (акционерных обществ под иностран-

ным управлением с низким уровнем локализации сборочного производства) как средства обоснования процессов укрепления внешнего контроля.

*Этап 3.* На данном этапе (рис. 2.4.11) после ряда потрясений, связанных с пошатнувшимся суверенитетом, угрозой прекращения кредитования и неустойчивостью роста уровня жизни происходит перелом к устойчивой негативной тенденции.

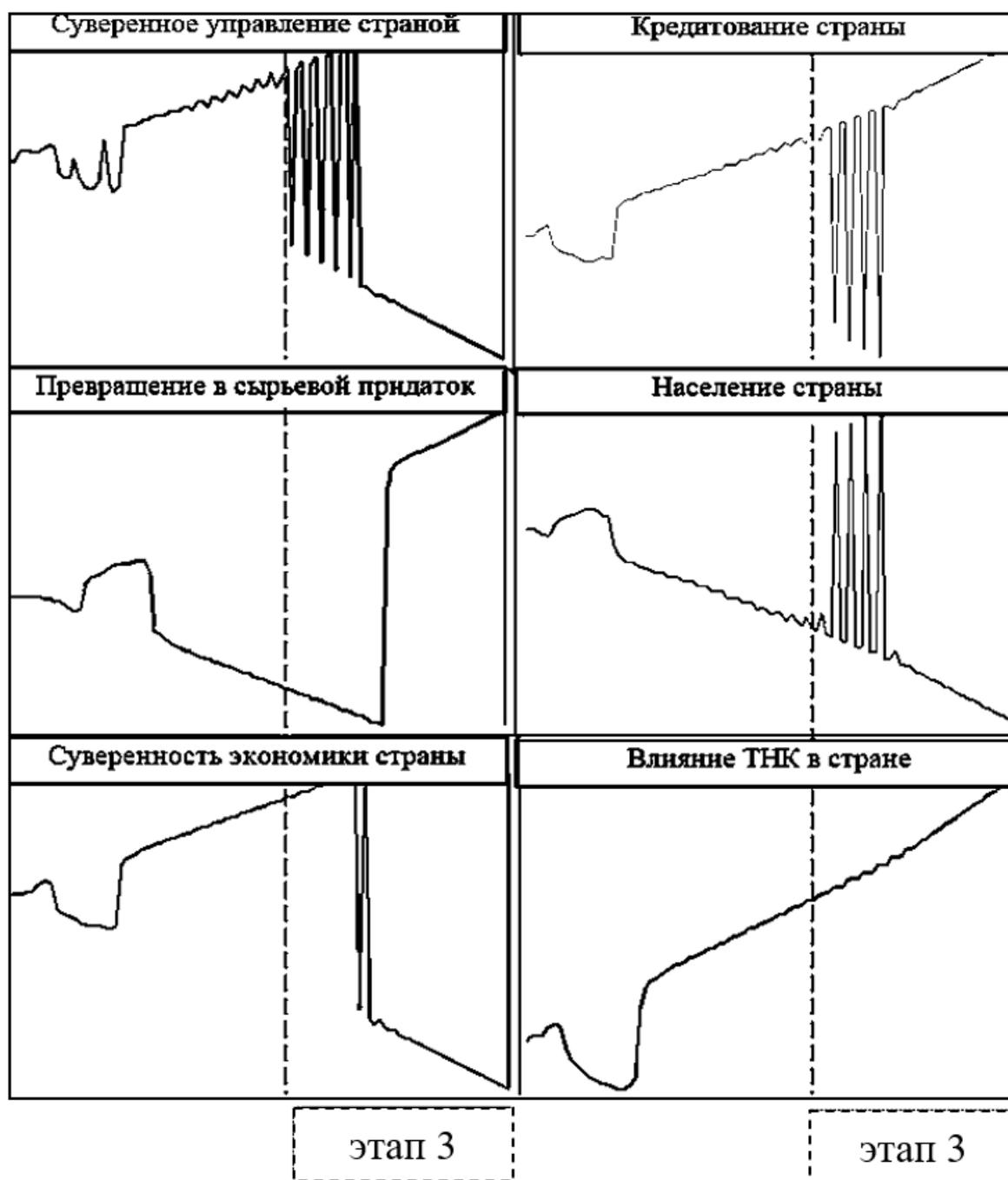


Рис. 2.4.11. Третий этап сценария

Прекращается поддержка ТНК уже подконтрольной обрабатывающей промышленности и начинается процесс ее ликвидации как экономически значимого субъекта (смена направления связи «Контроль ТНК» → «Обрабатывающая промышленность»). На фоне усиления внешнего кредитования наблюдается снижение экономического суверенитета, а также продолжается падение уровня жизни населения и дальнейший рост влияния ТНК.

*Этап 4.* Начало четвертого этапа (рис. 2.4.12) характеризуется длительным периодом снижения уровня жизни граждан, что стимулирует рост недовольства и протестных настроений основной массы населения.

В данных условиях становятся возможными спровоцированные сложившейся ситуацией протестные действия, которые органы исполнительной власти могут попытаться погасить, обратив возмущение социума на доминирование в стране иностранного капитала, что, в свою очередь, может привести к прекращению внешнего кредитования, ограничениям вывоза капитала и иным нежелательным для ТНК последствиям.

В целях недопущения подобного социального взрыва ТНК вынуждены направлять часть финансовых потоков на поддержку населения страны и насыщение потребительского рынка доступными товарами и услугами (активизация связи «Влияние ТНК в стране» → «Население страны»).

Одновременно с этим происходит «суверенный ребрендинг», имитирующий передачу части активов дочерним псевдонациональным компаниям для «поддержки» суверенности экономики страны и ее развития, например, за счет создания принадлежащих иностранному капиталу как новых производственных предприятий, так и организаций непромышленной сферы (активизация связи «Влияние ТНК в стране» → «Суверенность экономики страны»).

Данные процессы, как видно из графической интерпретации результатов моделирования, привели сначала к колебаниям, а затем и к определенному росту уровня жизни населения страны, который связывается социумом с результатами благоприятного влияния ТНК. На самом же деле данное влияние привело к дальнейшему снижению экономического суверенитета страны и росту угрозы ее превращения в сырьевой придаток стран «золотого миллиарда». На более длительном временном горизонте после кратковременного возмущения вновь продолжился рост влияния ТНК.

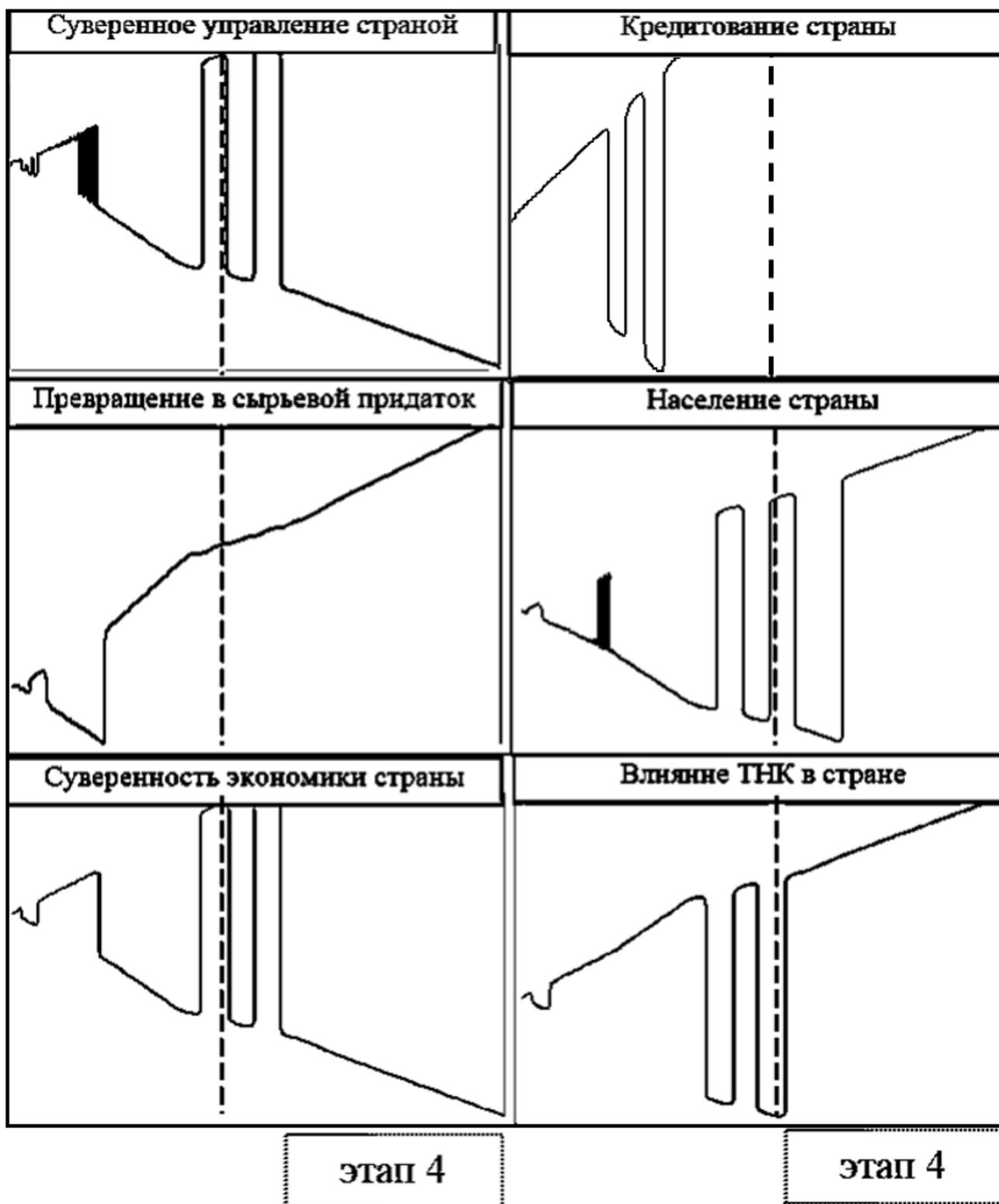


Рис. 2.4.12. Четвертый этап сценария

*Этап 5.* Данный этап (рис. 2.4.13) начинается с фактического лишения ТНК социальной поддержки. Окончательно закрепляются негативные тенденции влияния политики Вашингтонского консенсуса и укрепляется внешнее управление страной, ее зависимость от глобальной (а по сути – западной) производственно-экономической и финансовой систем.

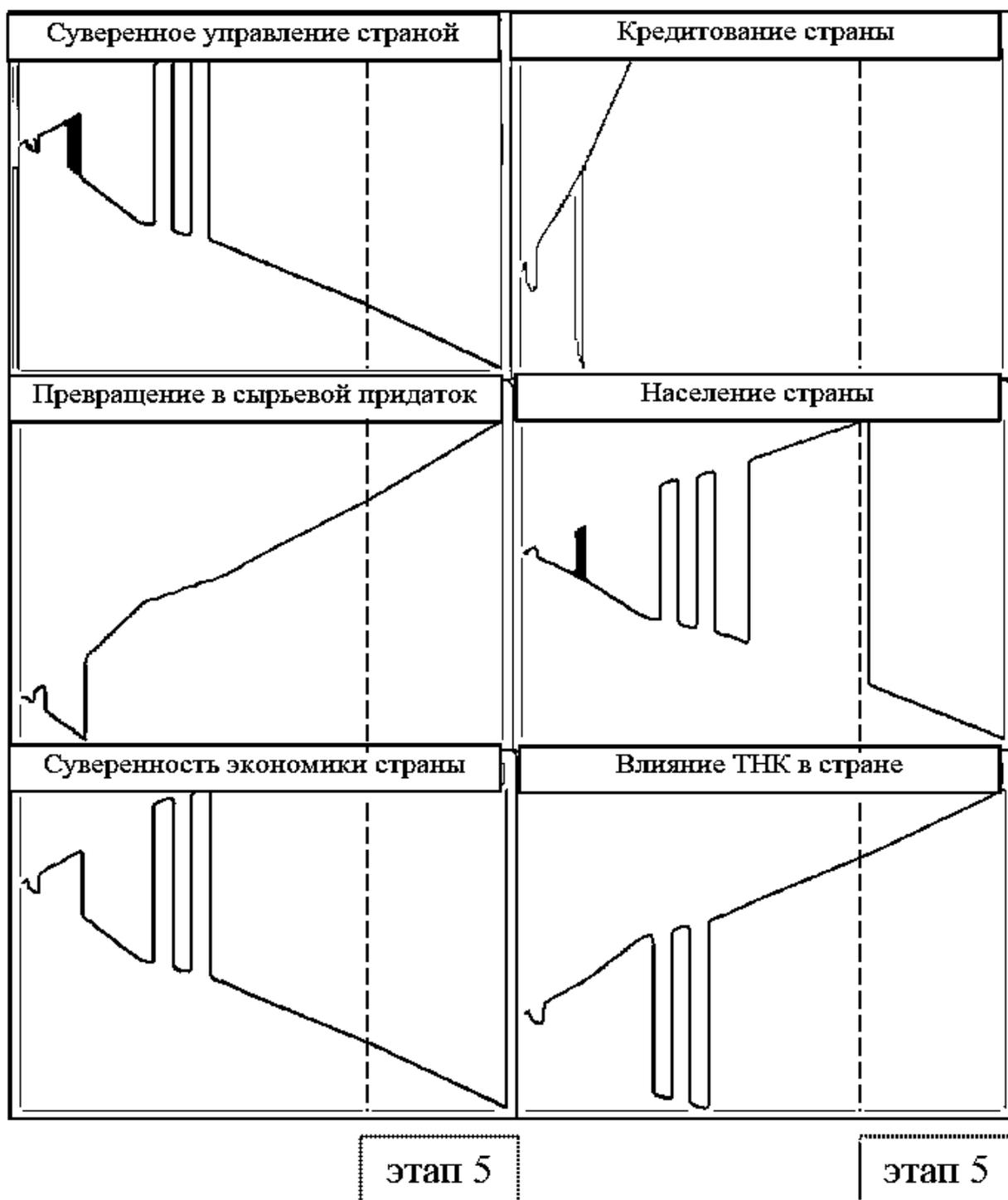


Рис. 2.4.13. Пятый этап сценария

Проведенное сценарное моделирование показало, что в совокупности положения Вашингтонского консенсуса выглядят привлекательно, однако конкретное их применение последовательно наряду с положительным влиянием порождает ряд проблем, которые приходится решать в рамках тех же самых положений. Кроме того, следование этим положениям создает условия для внешнего управления, которое не воспринимается как деструктивное, а наоборот выступает как средство снижения остроты многих противоречий и негативных процессов. По сути, внешне привлекательные и даже обоснованные на каждом этапе решения в конечном итоге способны привести к угрозам суверенитету и национальной безопасности страны. Таким образом, применение методологии сценарного анализа в данном случае показало, что не происходит успешная реализация своеобразного «жадного алгоритма», т. е. принятие решений локально обоснованных и решающих текущие проблемы (тактика) на каждом этапе не приводит к конечному положительному стратегическому результату. Это характерно для многих процессов управления сложными системами.

Основной целью представленных выше результатов сценарных исследований является не столько оценка последствий реализации политики Вашингтонского консенсуса для России, сколько анализ возможностей использования сценарных технологий для упреждающего диагностирования и исследования негативного влияния внешних угроз государственному развитию на длительный период времени.

Подготовка эффективных и прежде всего стратегических решений невозможна в случае «принесения в жертву» фактора неопределенности ради формирования однозначно понимаемого представления о будущих путях развития исследуемой ситуации. Подобный подход крайне опасен, поскольку недооценка фактора неопределенности может привести к выбору ошибочной стратегии с далеко идущими и крайне тяжелыми негативными последствиями. Недопустима и другая крайность, когда неопределенности придается гипертрофированное значение, вследствие чего происходит отказ от применения современных технологий опережающего анализа эффективности решений в сторону их принятия сугубо на интуитивной основе, либо на базе экстраполирования накопленного опыта решения аналогичных задач.

Исключение данных крайностей из процессов подготовки, обоснования и оценки эффективности решений и является одной из главных целей использования сценарного подхода [9]. Возможные пути и способы учета неопределенности в процессе сценарного моделирования представлены в табл. 2.4.2.

Таблица 2.4.2. Способы учета различных видов неопределенности в процессе сценарного моделирования

| Виды неопределенности   | Сценарный подход   |
|---|--|
| Неопределенность условий и исходных данных как об объекте управления, так и о состоянии факторов внешней среды  | <i>Вариант 1.</i> Формирование и исследование качественных моделей на основе анализа причинно-следственных связей, которые малочувствительны к точности и достоверности исходных данных.<br><i>Вариант 2.</i> Дополнение имеющейся неполной информации об обстановке прогнозными данными качественного характера о возможных событиях и последствиях реализации управленческих решений |
| Неопределенность целеполагания (в том числе в условиях многостороннего конфликта). Неоднозначность, а иногда и невозможность выбора одной цели.   | Формирование и анализ сценариев, оценивающих уровень противоречивости и достижимости целей управления при различных условиях   |
| Неопределенность в оценке реализуемости целей   | Анализ сценариев, оценивающих возможность достижения целей управления путем воздействия на ограниченное множество управляемых факторов сценарной модели, в том числе со стороны как взаимодействующих, так и конфликтующих (конкурирующих) субъектов   |
| Неопределенность действий, связанная с отсутствием однозначности критериев выбора решений   | Формирование и анализ альтернативных прогнозных сценариев с целью оценки последствий реализации принимаемых управленческих решений   |
| Перспективная неопределенность вследствие возможности появления факторов, которые при подготовке решения были неизвестны, либо недооценены в процессах анализа предметной области   | Оперативное изменение структуры сценарной модели и управление процессом моделирования с целью определения необходимых действий, направленных на корректировку целей или путей их достижения  |
| Ретроспективная неопределенность, связанная с отсутствием информации о поведении изучаемого объекта или процесса в прошлом, или при принципиальной невозможности использования такой информации для решения задач управления из-за асимметрии событий в прошлом и будущем | Формирование сценарных моделей на основе исследования различных трендов развития ситуации и экспертных оценок  |
| Неопределенность, связанная с невозможностью предсказания точных результатов принимаемых решений из-за лавинообразного нарастания объема исходной и оперативной информации об объекте управления, внешней среде или обстановке  | Формирование и исследование сценарных моделей с использованием устойчивых закономерностей на основе знаний, полученных в результате предварительного анализа больших объемов информации  |

По сути, инструменты сценарного подхода позволяют частично или полностью снизить влияние факторов неопределенности и перевести их из неуправляемой в управляемую область.

Поскольку технологически сценарий представляет собой упорядоченную во времени последовательность событий, на основе оценивания которых, как и сценария в целом, происходит выработка управленческих решений, то в процессе моделирования критически важным является возможность автоматической идентификации и «отсечки» данных событий в полученной общей картине, образуемой совокупностью динамических характеристик изменения значений определенного подмножества факторов модели на значительном временном интервале.

Представленная на рис. 2.4.14 графическая форма сценария представляет собой событийную форму сценария, которая сформирована на основе анализа динамики факторов рассмотренной выше модели [365].

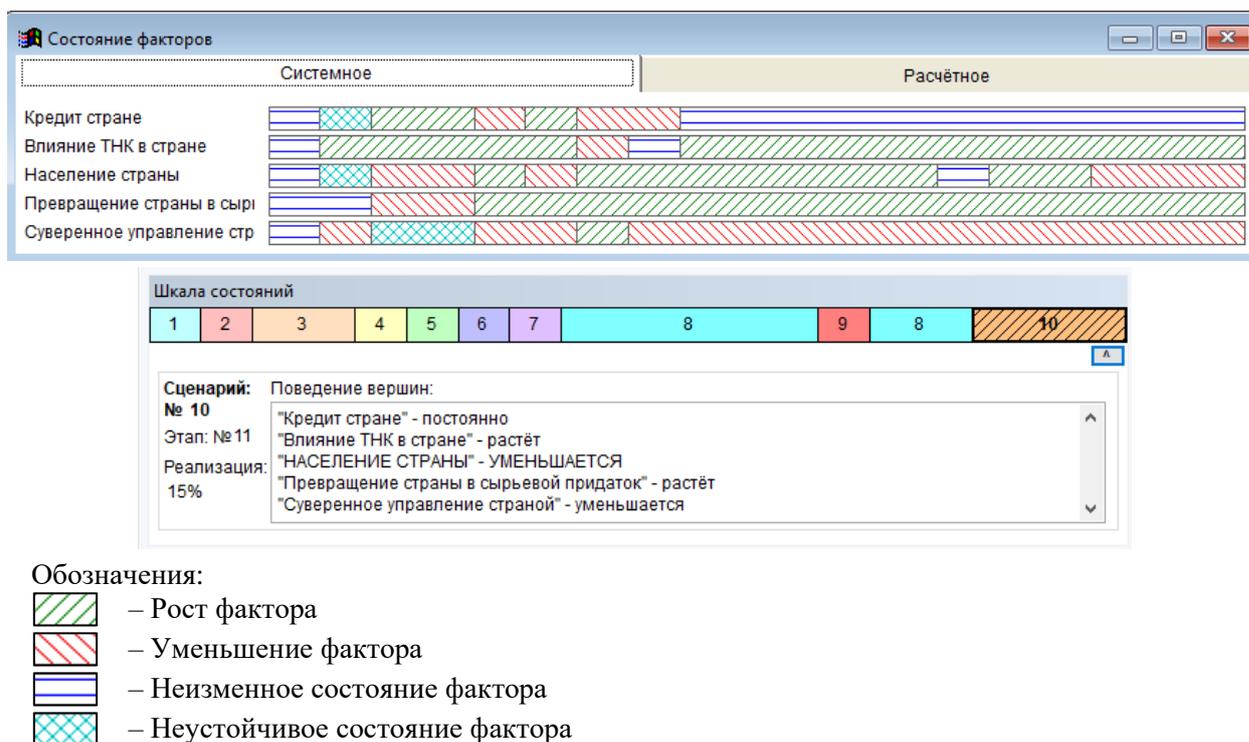


Рис. 2.4.14. Аналитическая пособытийная форма сценария

Ключевыми факторами, изменение поведения которых формирует события сценария, в данном случае являются: «Суверенное управление страной», «Население страны», «Кредит стране», «Влияние ТНК в стране», «Превращение страны в сырьевой придаток». Изменение динамики хотя бы одного из ключевых факторов означает завершение текущего события и начало формирования нового. В окне «Шкала состояний» представлено содержание последнего этапа полученного сценария в текстовом виде.

В целом сценарно-прогнозное моделирование в процессе подготовки и осуществления управленческих решений при планировании и реализации военных и специальных мероприятий, предоставляет возможности:

- многовариантного рассмотрения и анализа альтернативных путей развития проблемных ситуаций на заданном временном горизонте;
- выделения характерных для каждой из альтернатив множеств объективных и субъективных внешних и внутренних факторов развития, а также анализа характера их взаимосвязей и взаимозависимостей;
- обоснования и выбора общих и локальных критериев эффективности управления и ограничений;
- анализа структурных особенностей и возможных последствий реализации управленческих решений;
- формирования ключевых показателей и индикаторов, отражающих и объясняющих возможные пути развития проблемной ситуации и их соответствие желаемому (либо наоборот, недопустимому) результату с точки зрения поставленных целей;
- осуществления процедур аналитической оценки неопределенностей, существующих и потенциальных угроз безопасности и рисков при различных условиях;
- приобретения новых знаний как синергического эффекта от реализации процессов сценарного анализа исследуемых ситуаций на междисциплинарной основе, использование которых способно открыть новые возможности для повышения эффективности и результативности принимаемых управленческих решений.

Использование перечисленных выше возможностей позволяет повысить эффективность целеполагания, планирования и управления проведением военных и специальных операций, что достигается за счет роста обоснованности направленных на анализ и достижение заданных целей управленческих решений на основе результатов сценарно-прогнозной экспертизы возможных вариантов развития проблемных ситуаций, а также опережающей оценки возможных последствий принятия и реализации данных решений.

На тактическом уровне в рамках использования сценарного подхода в процессе управления военными и специальными операциями взятый за основу базовый сценарий возможно разбивать на ряд взаимосвязанных локальных сценариев, анализ которых позволит представить общее описание проблемной ситуации в виде некоторого множества фрагментов с выделением наиболее существенных оперативных деталей.

Таким образом, рассмотренные в главе модели безопасности и обороноспособности в сочетании со сценарным подходом предназначены для средне- и долгосрочного прогнозирования геополитической обстановки, оценки потенциалов безопасности государств и коалиций государств, их устойчивости (способности переносить кризисы и издержки, навязывать противнику свою волю). Эти модели относятся к базовому уровню военной кибернетики. Конкретные расчеты показателей безопасности и обороноспособности по тем или иным коалициям государств выполняются в рамках исследований на прикладном уровне.

## ГЛАВА 3. БАЗОВЫЕ ФУНКЦИИ В МОДЕЛЯХ БОЕВЫХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ДЕЙСТВИЙ

Практическую деятельность людей условно можно разделить на два вида: *производственная деятельность* (создание материальных и нематериальных благ) и *конфликтная деятельность* (перераспределение благ, создание правил и т. д.). В экономической теории им ставят в соответствие *производственные функции* (production functions) и функции конфликта – успеха в состязании (contest success functions). Созданием благ занимаются предприятия (фирмы), перераспределением – *институты*<sup>1</sup>, включая военные организации. Те и другие построены по иерархическому принципу, но отличаются по целям. В первом случае степень достижения цели характеризуется прибылью и объемом производства, во втором – вероятностью успеха или победы (чтобы достичь цели войны – навязать противнику свою волю, надо его победить).

В настоящей главе рассмотрены агрегированные производственные функции<sup>2</sup> и функции успеха в состязании (конflikте), а также приведены обоснования применения агрегированных функций<sup>3</sup> в задачах управления боевыми и специальными действиями.

### 3.1. Агрегированные функции производства и конфликта

Для экономического анализа производства, оценки военной мощи и безопасности государств, планирования боевых действий технологические и инженерные характеристики не представляют явного интереса. Экономист прежде всего интересуется различными комбинациями факторов производст-

---

<sup>1</sup> В институциональной экономике под институтом понимается правило или совокупность правил и внешний механизм принуждения к его исполнению. Ключевые функции институтов: координационная и распределительная [58].

<sup>2</sup> Производственные функции используются не только в экономике, но и в моделях геополитики, безопасности и других сферах деятельности.

<sup>3</sup> Под агрегированной функцией будем понимать функцию, применимую на макроуровне и использующую агрегированные переменные. В экономике агрегированные производственные функции применяются как инструмент прогнозирования и ретроспективного анализа [50]. Обзор методов агрегирования производственных функций представлен в работе [20].

ва и соответствующих выпусков продукции, аналитик в области безопасности строит индексы, учитывающие численности населения и вооруженных сил, площадь территории, объем ВВП, доли расходов по различным статьям и т. д., военный планировщик (оперативный отдел) – расчетом потребных сил и средств для победы над противником.

### 3.1.1. Производственные функции

*Производственная функция* отражает технологическую зависимость между затратами ресурсов и максимально возможным при данных затратах выпуске «продукции» (см. также раздел 2.2 выше).

В начале XX в. шведский математик-экономист К. Викселль предложил степенную производственную функцию, устанавливающую зависимость стоимости выпускаемой продукции  $Y$  от стоимости основных фондов  $K$  и оплаты труда  $L$ :

$$Y = F(L, K) = AL^\alpha K^\beta, \quad (3.1.1)$$

где:  $A$  – коэффициент, зависящий от технологии производства;  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$  – параметры (коэффициенты эластичности по труду и капиталу).

Отношение  $Y/L$  называют средней производительностью труда,  $Y/K$  – средней фондоотдачей,  $K/L$  – средней фондовооруженностью,  $L/K$  – средней трудообеспеченностью фондов.

Американские исследователи П. Дуглас и Ч. Кобб по данным в обрабатывающей промышленности США периода 1899-1922 гг. показали, что производственная функция имеет вид (*функция Кобба-Дугласа*, частный случай модели К. Викселля):

$$Y = AL^\alpha K^{1-\alpha}. \quad (3.1.2)$$

Перечислим другие виды производственных функций. *Линейная производственная функция*

$$Y = \alpha L + \beta K. \quad (3.1.3)$$

Эта функция обычно применяется при моделировании крупномасштабных систем (отрасль, экономика в целом), где выпуск продукции является результатом одновременного использования множества различных технологий.

*Функция Леонтьева* (функция с фиксированными пропорциями)

$$Y = \min\left(\frac{L}{a}, \frac{K}{b}\right), \quad (3.1.4)$$

где коэффициенты  $a$  и  $b$  выражают количество ресурса, необходимого для производства единицы продукта.

Функция Леонтьева предназначена для моделирования строго детерминированных технологий, не допускающих отклонения от технологических норм использования ресурсов на единицу продукта.

*Функция Солоу* (или функция постоянной эластичности замещения)

$$Y = A(vL^{-r} + (1-v)K^{-r})^{-\mu/r} \quad (3.1.5)$$

с ограничениями на параметры:  $\mu > 0$ ,  $0 \leq v \leq 1$ ,  $r \geq -1$ ,  $r \neq 0$ . Эта функция была проверена на статистических данных и оказалась более адекватной, чем функция Кобба-Дугласа (что не удивительно, так как в ней больше «подготовочных» параметров).

Наряду с двухфакторными производственными функциями рассматриваются многофакторные функции. Пусть  $x_i \geq 0$  – количество  $i$ -го фактора производства,  $x = (x_1, \dots, x_n)$ . Тогда, в частности, получим:

– мультипликативную степенную функцию (функцию Кобба-Дугласа):

$$f(x) = A \prod_{i=1}^n x_i^{\alpha_i}, \quad 0 < \alpha_i < 1, \quad (3.1.6)$$

– степенную среднюю функцию (постоянной эластичности замещения):

$$f(x) = A \left( \sum_{i=1}^n v_i x_i^{-r} \right)^{-\mu/r}, \quad v_i > 0, \mu > 0, \sum_{i=1}^n v_i = 1. \quad (3.1.7)$$

При применении многофакторных функций (кстати, как и в теории боевых потенциалов) возникает проблема единицы измерения: как разнородные факторы сравнивать между собой (например, станки, компьютеры и грузовики)? То есть требуется нахождение однородных единиц измерения факторов производства и результата.

Производственные функции используются в задачах оценки военной мощи (см. [564]) и анализа безопасности государств (см. вторую главу). Например, в статье «Война, мир и размеры государств» авторы [404] для  $i$ -й страны используют частный случай функции Солоу:

$$Y_i = A_H H_i + A_L L_i,$$

где под  $H_i$  понимается численность населения данной страны, а под  $L_i$  – размер ее территории.

### 3.1.2. Функции конфликта (успеха в состязании)

*Функции конфликта* определяют вероятности победы (поражения) в зависимости от усилий и/или ресурсов участников. Положим, что в конфликте (в экономических задачах – в конкурсе или аукционе) участвуют две стороны. Их усилия (ресурсы) обозначим через  $x > 0$  и  $y > 0$ , соответственно. Любой

комбинации усилий сторон поставлены в соответствие вероятности успеха (победы) –  $p_x(x, y)$  и  $p_y(x, y)$ . Достаточно хорошо исследованным является следующий класс функций победы (успеха):

$$p_x(x, y) = \frac{f_x(x)}{f_x(x) + f_y(y)}, \quad (3.1.8)$$

где  $f_x(\cdot)$  и  $f_y(\cdot)$  – неотрицательные, строго возрастающие функции. Приведем некоторые наиболее часто встречающиеся функциональные формы модели (3.1.8).

*Модель Г. Таллока [569]:*

$$p_x(x, y) = \frac{x^\mu}{x^\mu + y^\mu} = \frac{(x/y)^\mu}{(x/y)^\mu + 1}, \quad (3.1.9)$$

где  $\mu > 0$  – параметр решительности сторон, относится к классу моделей на основе отношения потенциалов (результат зависит от отношения усилий сторон).

*Модель Д. Макфаддена и Д. Хириляйфена*

$$p_x(x, y) = \frac{\exp(\mu x)}{\exp(\mu x) + \exp(\mu y)} = \frac{1}{1 + \exp(\mu(x - y))} \quad (3.1.10)$$

относится к классу моделей на основе разности потенциалов. К этому же классу относится *пробит-модель*  $p_x(x, y) = \Phi(x - y)$ , где  $\Phi$  – функция Лапласа. При анализе конфликтов и аукционов неантагонистического характера иногда применяется *разностная модель* вида

$$p_x(x, y) = \alpha_p + f_x(x) - f_y(y), \quad (3.1.11)$$

где  $0 < \alpha_p < 1$  и функции  $f_x(\cdot), f_y(\cdot)$  подобраны так, чтобы выполнялось условие  $p_x(\cdot) \in [0, 1]$ .

Теоретико-вероятностное обоснование функций конфликта основано на анализе влияния неучитываемых факторов (случайных ошибок) на результат. Функции регрессии в общем случае имеют вид  $Y_x = h(x, \varepsilon_x)$ ,  $Y_y = h(y, \varepsilon_y)$ , где функции ошибок  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  имеют равные нулю математические ожидания. Тогда вероятность победы первой стороны в конфликте равна:  $p_x(x, y) = P(Y_x > Y_y) = P(h(x, \varepsilon_x) > h(y, \varepsilon_y))$ . В предположении, что функция регрессии линейна, а функция распределения ошибок имеет вид  $F(u) = \exp(-\exp(-u))$  (функция экстремального распределения), Д. Макфадден получил модель бинарного выбора вида (3.1.10). Для функции регрессии мультипликативного вида и в предположении, что плотность распределения ошибок экспоненциальная, может быть получена модель вида (3.1.9).

Функции конфликта аксиоматизированы, в частности, Р. Люсом [516] и С. Скапердасом [559]. В основу аксиоматики положено *свойство независимости от посторонних альтернатив* (Independence of Irrelevant Alternatives property): в контексте конфликта это свойство требует, чтобы исход конфликта между любыми двумя сторонами зависел только от количества оружия, которым владеют эти две стороны, а не от количества оружия, которым владеют третьи стороны. Следующее важное требование к функциям конфликта – их *однородность нулевой степени*, т. е.  $p_x(tx, ty) = p_x(x, y)$  для всех  $t > 0$ . Модели (3.1.9) и (3.1.10) обладают *свойством симметрии или анонимности* в том смысле, что если усилия сторон поменять местами, то и вероятности их победы также поменяются местами.

С. Скапердас и др. отмечают, что несмотря на наличие значительного числа публикаций по моделированию конфликтов, конкурсов и аукционов в различных сферах деятельности, лишь в небольшом количестве публикаций затрагиваются вопросы верификации функций конфликта на реальных данных [485].

В задаче «нападение–защита» Ю.Б. Гермейер использовал следующую целевую функцию [107]:

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n \max[x_i - s_i y_i, 0], \quad (3.1.12)$$

где:  $x_i \geq 0$  и  $y_i \geq 0$  – количество средств нападения и защиты, выделенных на  $i$ -й пункт;  $s_i$  – количество средств нападения, которое может уничтожить одна единица средств защиты на пункте  $i$ .

Восстановим функцию победы в боестолкновении, соответствующую целевой функции Ю.Б. Гермейера (3.1.12). Заметим, что в выражении (3.1.12)  $s_i y_i$  есть математическое ожидание уничтоженных средств нападения на пункте  $i$ , т. е. используется следующая вероятность прорыва обороны на этом пункте

$$\pi_x(x_i, y_i) = \begin{cases} \frac{\beta_i x_i - y_i}{\beta_i x_i}, & \beta_i x_i - y_i \geq 0, \\ 0, & \beta_i x_i - y_i < 0, \end{cases} \quad \beta_i = \frac{1}{s_i}, \quad (3.1.13)$$

а количество прорвавшихся единиц определяется как произведение  $\pi_x(x_i, y_i)$  на  $x_i$ . То есть при  $\pi_x(x_i, y_i) = 0$  вероятность победы  $p_x(x_i, y_i) = 0,5$ , т. к.  $\beta_i x_i = y_i$ . Естественно предположить, что  $p_x(x_i, y_i) = 1$  при  $y_i = 0$ . Рассмотрим простейший, линейный по  $p_x(x_i, y_i)$ , случай вида функции победы:  $2p_x(x_i, y_i) - 1 = \pi_x(x_i, y_i)$ . Тогда получим:

$$p_x(x_i, y_i) = \frac{2\beta_i x_i - y_i}{2\beta_i x_i}, \quad 2\beta_i x_i \geq y_i. \quad (3.1.14)$$

Содержательно трудно объяснить наличие в функции победы Ю. Гермейера сомножителя 2 в числителе и знаменателе и использование функции разности сил.

Другой недостаток целевой функции (3.1.12) – в ней не учитывается известный в военной науке факт, что при достижении определенного процента потерь (до 30%) наступающая сторона отказывается от действий на данном пункте (см. [214; 280] и четвертую главу ниже).

В работе [75] исследована динамическая модель двустороннего боя небольших по численности однородных боевых единиц и обоснована функция победы в бою.

В дискретные периоды времени  $t = 0, 1, \dots$  единицы сторон, распределенные равномерно по фронту, выполняют прицельную стрельбу по противнику. Пусть  $x(t)$  и  $y(t)$  – численности боевых единиц первой и второй стороны в момент времени  $t$ . Начальные численности сторон равны  $x(0) = x_0$ ,  $y(0) = y_0$ . Введены следующие допущения: боевые единицы сторон однородны, в каждый период времени стрельба единицей ведется по одной цели противника, дальность поражения противника не зависит от расстояния до него и от скорости перемещения единиц на поле боя.

Динамика изменения численностей сторон задается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= x(t) - \lambda(t), \\ y(t+1) &= y(t) - \mu(t), \end{aligned} \quad (3.1.15)$$

где  $\lambda(t)$  и  $\mu(t)$  – потери первой и второй стороны в период времени  $t$ . Обозначим через  $\pi$  и  $\rho$  – вероятности поражения противника единицей первой и второй стороны в течение одного периода.

Показано, что вероятность победы первой стороны может быть аппроксимирована следующей функцией:

$$p_x(x_0, y_0) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt, \quad z = a b m, \quad (3.1.16)$$

где:  $a > 0$  – фиксированный коэффициент,  $b$  – параметр превосходства первой стороны,  $m$  – параметр масштаба.

При учете в динамической модели неопределенностей, связанных с согласованностью действий сторон, их маневренностью и характеристиками местности есть основания считать, что с ростом уровня боевых действий (и с увеличением численностей группировок сторон) одна и та же вероятность победы будет достигаться при меньших отношениях сил сторон.

### 3.1.3. Функция распределения потерь в конфликтах

В 1948 г. Л. Ф. Ричардсон обнаружил, что распределение жертв в конфликтах подчиняется степенному закону [542]:

$$p(x) = cx^{-\alpha}, \quad (3.1.17)$$

где:  $c > 0$  – коэффициент,  $\alpha$  – параметр масштаба,  $p(x)$  – вероятность события, что в конфликте (войне, террористическом акте и т. д.) будет  $x$  жертв.

Современные исследования подтвердили справедливость закона Ричардсона на основе анализа данных о войнах за период с 1816 по 1980 г. и о террористических актах с 1968 по 2008 г. Для террористических атак получено следующее значение параметра масштаба  $\alpha = 2,4 \pm 0,2$  (при  $x \geq 10$ ).

А. Клаузет и Ф. В. Вигель, основываясь на идее самоорганизующейся критичности, предприняли попытку обоснования справедливости степенного закона для террористических атак [440]. Ими введены следующие пять предположений о взаимодействии ячеек внутри террористической организации.

*Предположение 1.* Существует  $N \gg 1$  радикализированных личностей (далее – агентов), склонных к терроризму. Это количество не меняется со временем. В случае уничтожения части террористов в результате атак, контртеррористических мер или внутренних конфликтов им на смену приходят другие агенты.

*Предположение 2.* Эти агенты могут объединяться в группы, численностью  $k = 1, 2, 3, \dots$  лиц.

*Предположение 3.* Эти группы могут увеличиваться в размере в результате процессов объединения. В частности, полагается, что любые две группы численностью  $k$  и  $l$  соответственно за единичный интервал времени объединятся в одну группу численностью  $(k + l)$  с вероятностью  $A_0(kl)^s$ , где  $A_0$  и  $s$  – параметры модели, причем  $s \approx 1$  (линейная модель).

*Предположение 4.* Группы самопроизвольно распадаются на отдельных агентов с вероятностью  $b(k)$  за единицу времени.

*Предположение 5.* В любой момент времени любая группа может организовать террористический акт. Вероятность атаки не зависит от размера террористической группы и от времени, прошедшего с предыдущей атаки. Сила атаки  $v(k)$  пропорциональна численности  $k$  террористической группы.

Используя методы статистической физики, доказано, что сила террористической атаки (оцениваемая ожидаемым количеством жертв) подчиняется степенному закону:

$$p_k \propto k^{-\alpha}, \quad \alpha = s + 3/2 = 5/2. \quad (3.1.18)$$

Причем полученное выражение для силы террористических атак не зависит от вероятности  $b(k)$ . Содержательно это означает, что усилия правительства, направленные главным образом на разрушение террористических ячеек, не приведут в долгосрочном плане к снижению террористической активности. Борьба с терроризмом будет более эффективна, если удастся сократить число радикально настроенных лиц за счет социальных и иных мер.

Таким образом, в задачах обеспечения безопасности, оценки геополитической мощи стран и при подготовке боевых действий используются и производственные функции (как элемент национальной мощи или безопасности) и функции конфликта. Их применение целесообразно на этапе планирования и прогнозирования боевых и специальных действий.

## 3.2. Функция победы в бою, сражении, операции

Функция победы в бою (сражении, операции) является частным видом функции конфликта (успеха в состязаниях) и предназначена для использования в задачах управления при подготовке боевых и специальных действий, а также в задачах обоснования перспективного облика общевойсковых подразделений, частей и соединений.

### 3.2.1. Закон поражения целей А. Н. Колмогорова

В 1945 году А. Н. Колмогоров предложил критерий эффективности стрельбы, основанный на законе поражения целей – зависимости вероятности поражения одиночной или групповой цели (математического ожидания числа пораженных целей) от количества выстрелов по ней [170].

Вероятность поражения цели (событие  $A$ ) при  $x$  попаданиях по ней вычисляется по формуле:

$$P(A | x) = 1 - e^{-\alpha x}, \quad (3.2.1)$$

где  $\alpha > 0$  – параметр.

А. Н. Колмогоров отметил, что допущение (3.2.1) «не менее (но и не более!) произвольно», чем выражение

$$P(A | x) = \begin{cases} 0, & x < k, \\ 1, & x \geq k, \end{cases} \quad (3.2.2)$$

где  $k$  – требуемое число попаданий по цели, «но приводит к значительно более простым результатам» [170, с. 24].

Нормы расхода снарядов зависят от типа цели и степени ее защищенности, используемых средств поражения, дальности до цели, способа подготовки к стрельбе и др. условий. В таблице 3.2.1 приведены нормы расхода снарядов для поражения некоторых неподвижных ненаблюдаемых целей [305].

Таблица 3.2.1. Нормы расхода снарядов для поражения неподвижных ненаблюдаемых целей

| Калибр, мм            | Поражаемые цели  |  |                                   |
|-----------------------|--|--|-----------------------------------|
|                       | Батарея (взвод) укрытых буксируемых орудий (минометов) | Живая сила и огневые средства, КП укрытые; танки, БМП, БТР в районе сосредоточения | Живая сила, расположенная открыто |
|                       | Подавление   |  | Уничтожение                       |
|                       | На цель  | На 1 га  | На 1 га                           |
| Нарезные орудия       |  |  |                                   |
| 122                   | 240  | 180  | 40                                |
| 152                   | 180 (60)   | 120 (-)  | 25 (8)                            |
| Минометы              |  |  |                                   |
| 120                   | 300  | 200  | 25                                |
| 240                   | 150  | 50   | 15                                |
| Реактивная артиллерия |  |  |                                   |
| БМ-21                 | 500  | 160  | 35                                |
| Ураган                | 180 (40)   | 15 (-)   | 7 (1)                             |

Примечания (неполные):

1. В таблице 3.2.1 приведен расход осколочно-фугасных снарядов, в скобках – расход кассетных снарядов осколочного действия, прочерк означает, что стрельба на поражение нецелесообразна.

Нормы расхода снарядов даны для следующих условий:

дальность стрельбы до 10 км включительно, установки для стрельбы на поражение определены способом полной подготовки или с использованием данных пристрелочного орудия, а для реактивной артиллерии – способом полной или сокращенной подготовки;

при стрельбе на дальности более 10 км расход снарядов увеличивают на 1/10 на каждый последующий километр дальности свыше 10 км (кроме реактивной артиллерии).

2. Если небронированная цель расположена укрыто, расход снарядов увеличивают в 3 раза. Если батарея (взвод) буксируемых орудий (минометов) располагается открыто, расход снарядов уменьшают в 3 раза.

Отдельно рассчитаны нормы для поражения других неподвижных целей, колонн и высокоманевренных целей, для задымления и дистанционного минирования и т. д.

Как видим, уже при оценке поражения разведанных целей с известной дальностью до них и назначенным нарядом средств поражения требуется учитывать большое количество факторов и условий. Неопределенности увеличиваются на порядки при моделировании общевойскового боя, особенно

на этапе его подготовки, когда в лучшем случае известны: а) типовые организационные структуры противника и его вооружение (батальонная тактическая группа, танковая или мотопехотная бригада, механизированная дивизия и т. д.); б) примерная численность противника (степень укомплектованности); в) степень инженерного обеспечения, г) характер местности в районе боевых действий.

### 3.2.2. Функция победы в бою, сражении, операции

Положим, что в бою (сражении, операции) принимают участие две стороны. Боевые действия могут вестись в виде наступления, обороны, встречного боя (сражения) и т. д.

Введем следующие ограничения и допущения.

1) Сторонам известны типовые организационные структуры противника, боевые возможности подразделений и тактика действий.

2) Стороны независимо друг от друга принимают рациональные решения по размещению своих боевых единиц и подразделений с целью нанесения максимального урона противнику и/или минимизации своих потерь.

3) Отсутствует ввод резервов и вывод частей и подразделений в резерв, возможности сторон рассчитываются на начало боя.

Обозначим  $X$  и  $Y$  – случайные величины, – количества попаданий, необходимых для поражения целей противника первой и второй сторонами.

Исходя из закона поражения целей А. Н. Колмогорова, положим, что вероятности решения сторонами поставленных задач (поражения целей противника) подчиняются экспоненциальному распределению:

$$F_x(x) = 1 - e^{-c_x x}, \quad c_x = (\lambda r_x)^{-m}, \quad (3.2.3)$$

$$F_y(y) = 1 - e^{-c_y y}, \quad c_y = (\mu r_y)^{-m}, \quad (3.2.4)$$

где:  $x$  – количество попаданий единицами первой стороны по целям второй,  $y$  – количество попаданий единицами второй стороны по целям первой,  $r_x$  и  $r_y$  – численности боевых единиц первой и второй стороны,  $\lambda > 0$  ( $\mu > 0$ ) – параметр первой (второй) стороны,  $m > 0$  – параметр масштаба боевых действий.

В условиях принятых ограничений и допущений есть основания полагать, что случайные величины  $X$  и  $Y$  независимы.

Математические ожидания случайных величин  $X$  и  $Y$  равны:

$$E[X] = (\lambda r_x)^m, \quad E[Y] = (\mu r_y)^m, \quad (3.2.5)$$

а плотности экспоненциальных распределений таковы:

$$f_x(x) = c_x e^{-c_x x}, \quad (3.2.6)$$

$$f_y(y) = c_y e^{-c_y y}. \quad (3.2.7)$$

Содержательно математические ожидания  $E[X]$  и  $E[Y]$  есть ожидаемые количества пораженных целей противника и являются численными характеристиками *боевых потенциалов* сторон. Очевидно, что с увеличением численностей боевых единиц сторон растет их боевой потенциал – появляется возможность поражения большего количества целей противника.

Сами по себе, в отдельности выражения (3.2.3) и (3.2.4) не представляют практической ценности. Действительно, в них учтены возможности своих войск, а параметры  $\lambda$  и  $\mu$  должны быть рассчитаны для конкретных целей противника, учитывать их характер, местоположение, степень защищенности и маскировки и т. д. и т. п.

Найдем вероятность того, что случайная величина  $X$  будет принимать большие значения, чем случайная величина  $Y$  (в предположении, что величины  $X$  и  $Y$  независимы):

$$P(x > y) = \int_0^{\infty} f_x(x) \left[ \int_0^x f_y(y) dy \right] dx. \quad (3.2.8)$$

Опуская промежуточные выкладки, получим решение [394]:

$$P(x > y) = \frac{c_y}{c_x + c_y} = \frac{(\lambda r_x)^m}{(\lambda r_x)^m + (\mu r_y)^m} = \frac{(\beta r_x)^m}{(\beta r_x)^m + (r_y)^m}, \quad \beta = \frac{\lambda}{\mu}. \quad (3.2.9)$$

Содержательно вероятность  $P(x > y)$  есть вероятность (функция) победы первой стороны над второй,  $\beta$  – параметр боевого превосходства первой стороны. Отметим, что выражение (3.2.8) справедливо для более широкого класса распределений: если экспоненциальные распределения (3.2.3) и (3.2.4) заменить на показательные (с основанием степени  $a > 1$ ), то результат не изменится.

Обозначим  $q = \beta r_x / r_y$  – отношение сил сторон, тогда

$$P_x = \frac{q^m}{q^m + 1} = 1 - s^{-m}, \quad s^m = q^m + 1, \quad s > 1, \quad (3.2.10)$$

т. е. получили распределение Парето.

Итак, выше показано, как выполняется переход с операционного уровня (уровня отдельных боевых единиц или частных тактических задач, см. выражения (3.2.3) и (3.2.4)) к тактическому (оперативному, оперативно-стратегическому) уровню (выражение (3.2.9)). Если оценки параметров  $\lambda$  и  $\mu$  выполняются отдельно для конкретных типов целей и средств поражения, то для оценки параметра боевого превосходства  $\beta$  достаточно знать типовые организационные структуры сторон, тактико-технические характеристики образцов вооружения и характеристики поля боя (свойства местности и т. д.).

Для определения параметра превосходства как отношения, его расчет выполняется по формуле [182]:

$$\beta = \varphi\rho = \frac{\varphi_x}{\varphi_y} \sqrt[4]{\rho_s \rho_v \rho_p \rho_m}, \quad (3.2.11)$$

где:  $\varphi$  – параметр морального превосходства первой стороны над второй,  $\rho$  – параметр технологического превосходства<sup>1</sup>.

Параметр  $\varphi$  морального превосходства оценивается процентами потерь ( $\varphi_x$  и  $\varphi_y$ ), при достижении которых стороны все еще способны вести боевые действия. Состав параметра  $\rho$  следует из определения боя (бой представляет собой совокупность согласованных по цели, месту и времени ударов, огня и маневра войск для уничтожения (разгрома) противника, отражения его ударов и выполнения других задач);  $\rho_s$  ( $\rho_v$ ,  $\rho_p$ ,  $\rho_m$ ) – превосходство первой стороны над второй в согласованности действий (соответственно, в разведке, огневых возможностях и маневренности).

В таблице 3.2.2 представлены показатели для расчета параметра  $\beta$ .

Таблица 3.2.2. Базовые показатели превосходства над противником

| № | Показатель   | Обозначение               | Примечание  |
|---|--|---------------------------|---|
| 1 | Выдерживаемые потери, при которых соединение (часть, подразделение) еще способно вести боевые действия | $\varphi_x$ и $\varphi_y$ | Данные военной статистики, оценка морально-психологического состояния войск     |
| 2 | Степень подготовленности командного состава  | $s_{H1}$ и $s_{O1}$       | Продолжительность службы в командных должностях и др.                           |
| 3 | Степень слаженности личного состава  | $s_{H2}$ и $s_{O2}$       | Продолжительность учений, тренировок и т. д.                                    |
| 4 | Возможности АСУ  | $s_{H3}$ и $s_{O3}$       | Среднее время с момента обнаружения цели до ее поражения                        |
| 5 | Возможности войсковой разведки противника  | $v_H$ и $v_O$             | Доли площади района боевых действий, непрерывно обследуемых средствами разведки |
| 6 | Средневзвешенные дальности эффективного поражения целей противника                                     | $d_H$ и $d_O$             | Рассчитываются по типовым целям с учетом законов поражения                      |
| 7 | Средневзвешенные доли боекомплекта, необходимые для поражения целей противника                         | $r_H$ и $r_O$             | Рассчитываются по типовым целям с учетом степени подготовленности поля боя      |
| 8 | Количество боекомплектов, имеющихся в распоряжении сторон  | $p_H$ и $p_O$             | Рассчитываются по всей номенклатуре и характеризуют возможности логистики       |
| 9 | Средние скорости боевого перемещения подразделений и резервов  | $m_H$ и $m_O$             | Рассчитываются с учетом свойств местности, ее минирования и т. д.               |

<sup>1</sup> В шкале отношений допустимым средним является среднее геометрическое [272].

Тогда компоненты параметра технологического превосходства (3.2.11) оцениваются по формулам<sup>1</sup>:

$$\rho_s = \sqrt[3]{\frac{s_{H1} s_{H2} s_{O3}}{s_{O1} s_{O2} s_{H3}}}, \quad \rho_v = \frac{v_H}{v_O}, \quad \rho_p = \sqrt[3]{\frac{d_H r_H p_H}{d_O r_O p_O}}, \quad \rho_m = \frac{m_H}{m_O}. \quad (3.2.12)$$

Уточнение параметров  $\varphi_x$  и  $\varphi_y$  выполняется по данным военной статистики. Аналитические оценки параметра  $\rho$  и его компонентов целесообразно уточнять по результатам опытных учений, имитационных игр и т. д.

Обсудим понятие «боевая единица» (в наших моделях их численности обозначены  $r_x$  и  $r_y$ ). В 1-м издании Большой советской энциклопедии дается следующее определение: «БОЕВАЯ ЕДИНИЦА, такое количество бойцов (орудий, пулеметов, бронемашин и пр.) одного рода войск, которое действует в бою по непосредственным указаниям одного командира (голосом, знаком, примером). В древности целые армии сражались в сомкнутых и глубоких построениях, занимая мало места (фаланга, клин). С возрастанием могущества огнестрельного оружия эти сплошные массы расчленились на мелкие, и значение Б. е. сначала перешло в пехоте к батальону, а затем к роте и в данное время – к группам силой в отделение (стрелковое, пулеметное). В коннице издавна (по принципу удара массой) Б. е. считается эскадрон; при действии в спешенном строю – подобно пехоте. В артиллерии, под влиянием технических усовершенствований, Б. е. может в данное время считаться боевой взвод и даже отдельное орудие. В пулеметных частях Б. е. — один пулемет»<sup>2</sup>.

Наряду с понятием «боевая единица» при планировании боевых действий используются термины «расчетная единица вооружения», «расчетно-снабжение единица» и др.

Представляется обоснованным под боевой единицей понимать личный состав подразделений, частей и соединений (включая отдельных бойцов, членов боевых экипажей, командиров и личный состав боевых и обеспечивающих подразделений). Такое определение боевой единицы, во-первых, отражает тот факт, что бой – это главным образом деятельность, он характеризуется такими чертами, как решительность, активность, выносливость, творчество командиров и бойцов (всякий бой есть психологический акт, заканчивающийся отказом от него одной из сторон), во-вторых, отвечает требованиям военной науки и военной статистики (первейший и важнейший показатель сторон в бою, операции – численный состав войск), в-третьих,

<sup>1</sup> Формулы имеют приближенный характер и могут использоваться только на этапе подготовки к боевым действиям, когда не ясны ожидаемые действия противника.

<sup>2</sup> Большая советская энциклопедия / гл. ред. О. Ю. Шмидт. Т. 6. Бессарабия–Больш. – М.: Советская энциклопедия, 1927. – 644 столбец.

позволяет учесть как моральные факторы войск, так и тактико-технические характеристики вооружения и военной техники, все виды боевого и материально-технического обеспечения.

### 3.2.3. Оценка параметра масштаба

Сначала рассмотрим содержательную оценку параметра масштаба боевых действий  $m$  (см. выражение (3.2.9)). В таблице 3.2.3 показаны элементы оперативного построения советских войск к началу Московской стратегической оборонительной операции (30.09–5.12.1941) [76].

Таблица 3.2.3. Оперативное построение советских войск к началу Московской оборонительной операции

| Объединение (кол-во армий) | Ширина полосы обороны (км) | Глубина оперативного построения (км) | Личного состава в дивизиях и бригадах (тыс. чел.) | Орудий и минометов     | Танков                |
|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|---|------------------------|-----------------------|
| Западный фронт (А–Б)       | 347                        | 30-55                                | 262,4<br>(1:1,5; 1:4,1)                           | 4028 (1:1,4;<br>1:6,0) | 486 (1:1,2;<br>1:31)  |
| Резервный фронт (А–Б)      | 108/258*                   | 50-80                                | 371,2<br>(1:1,1; 1:5,3)                           | 4752 (1:1;<br>1:12)    | 301 (1:2,7;<br>1:12)  |
| Брянский фронт (А-3, ОГ-1) | 345                        | 20-60                                | 198,9<br>(1:1,3; 1:3,4)                           | 1529 (1:2,2;<br>1:6)   | 257 (1:1,2;<br>1:1,3) |

\* В числителе – ширина полосы обороны войск первого эшелона, в знаменателе – ширина полосы обороны армий, развернутых на Ржевско-Вяземском оборонительном рубеже.

По личному составу, артиллерии и танкам указано общее количество, в скобках – соотношение с противником в полосе фронта и на направлении главного удара противника.

В полосе трех фронтов использовалось 545 боевых самолетов, противником – 1390, общее соотношение – 1:2,5.

На одну дивизию ширина фронта составляла (в полосе фронта и на направлении главного удара противника, км): Западный фронт – 9,9 и 3,4, Резервный фронт – 20,9 и 2,9, Брянский фронт – 11,9 и 1,1.

В ходе Курской стратегической оборонительной операции (5-23.07.1943) Центральный фронт (в составе А – 5, ТА – 1, ВА – 1) оборонял полосу по фронту 306 км и в глубину – 44 км; Воронежский фронт (А – 5, ТА – 1, ВА – 1) – 244 км и 64 км соответственно.

По опыту Великой Отечественной войны боевой порядок советской стрелковой дивизии строился, как правило, в два эшелона, в полосе по фронту 8-12 км и в глубину 8-10 км. Основные артиллерийские средства дивизии обеспечивали маневр огнем во всей полосе обороны, второй эшелон (резерв)

мог своевременно контратаковать вторгшегося в глубину обороны противника.

Полосы обороны армии и фронта имели относительно небольшую глубину и большой пространственный размах. При этом был ограничен маневр огнем и войсками по фронту (за исключением боевой авиации), см. рис. 3.2.1.



Рис. 3.2.1. Полоса обороны дивизии (слева) и армии (фронта)

На тактическом уровне вероятность победы наступающих равна (при значении параметра масштаба  $m = 1$ ):

$$P_x^t = \frac{q}{q+1} = \frac{\beta x}{\beta x + y}, \quad q = \frac{\beta x}{y}.$$

На оперативном (стратегическом) уровне в сражении (операции) задействованы все силы  $x$  наступающих и, в силу значительной растянутости фронта и относительно низких возможностей по маневру войсками и оружием, только часть сил  $\Delta y < y$  обороняющихся (их значительная часть находится на пассивных участках). Тогда с учетом пассивных участков обороны вероятность победы на оперативном (оперативно-стратегическом) уровне равна:

$$P_x^s = \frac{cq}{cq+1}, \quad c = \frac{y}{\Delta y} > 1,$$

где  $c$  – параметр, учитывающий пассивность отдельных полос обороны.

Тогда из условия

$$\frac{cq}{cq+1} = \frac{q^m}{q^m+1} \quad (\text{или} \quad \frac{c\beta x}{c\beta x + y} = \frac{(\beta x)^m}{(\beta x)^m + y^m}) \quad (3.2.13)$$

можно найти значение параметра масштаба. Например, при  $q = 1,5$  и  $c = 1,5$  получим  $m = 2$ , а при  $q = 1,5$  и  $c = 2,3$  будет  $m = 3$ . Значение параметра масштаба  $m > 1$  отражает тот факт, что обороняющаяся сторона не задействует все имеющиеся силы и средства, часть из них пассивны.

М. П. Осипов исследовал 38 крупнейших сражений за 1805-1905 гг. [274]. Относительно предсказуемым является исход сражений в зависимости от отношения сил сторон (рис. 3.2.2). Вместе с тем, доли потерь сторон мало

зависят от соотношения сил (рис. 3.2.3). Коэффициент корреляции между отношением сил сторон и потерями сильнейшей стороны равен  $-0,39$  (отрицательная корреляция), а между потерями слабой стороны и отношением сил этот коэффициент положителен и равен  $0,13$ .

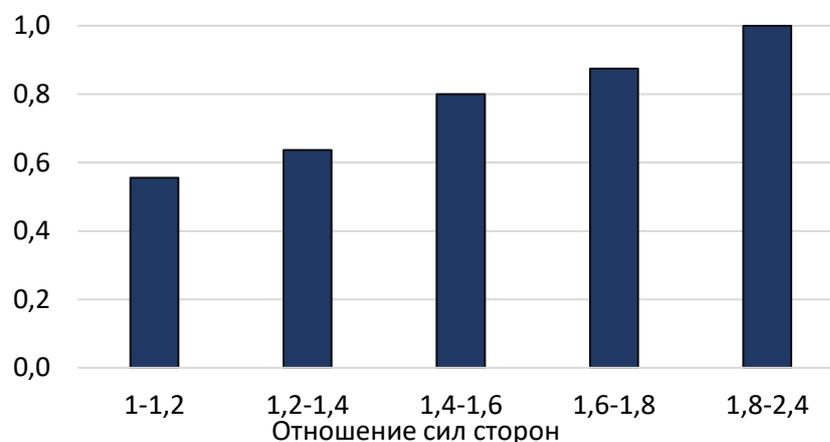


Рис. 3.2.2. Доля побед сильнейшей стороны в сражениях 1805-1905 гг.

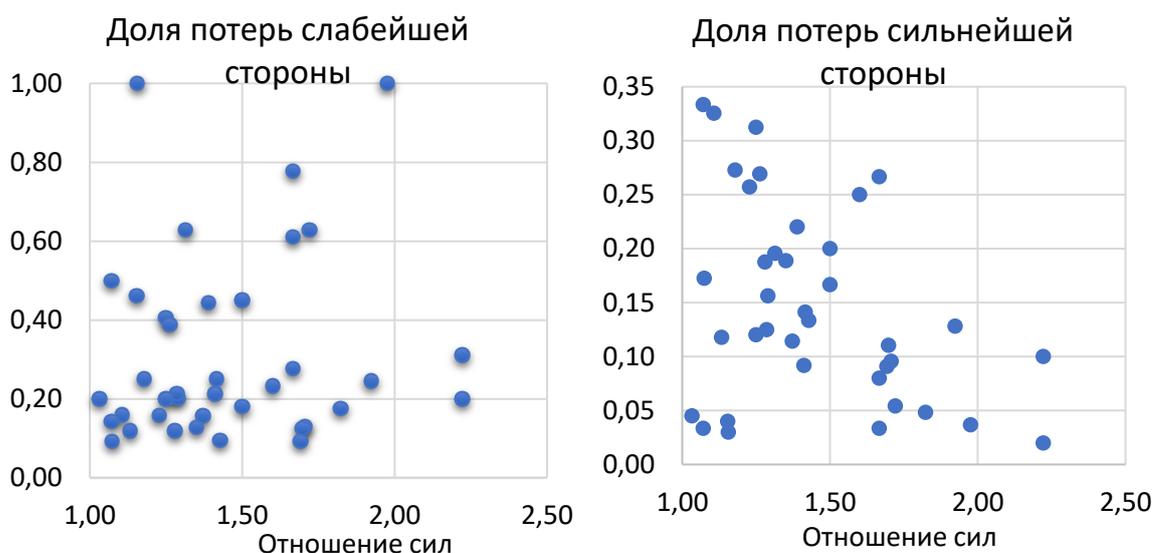


Рис. 3.2.3. Доли потерь сторон в сражениях 1805-1905 гг.

Рассмотрим результаты количественного анализа стратегических операций в годы Великой Отечественной войны (без Харьковской, Киевской и Северо-Кавказской оборонительных операций, всего в расчетах 47 операций [76]). Поскольку сражались две индустриально развитые державы, то параметр боевого превосходства в расчетах был принят  $\beta = 1$  (такой же подход использовал М. П. Осипов).

На рис. 3.2.4 показан график безвозвратных потерь советских войск в зависимости от их превосходства над противником (данные по немецким потерям отсутствуют).

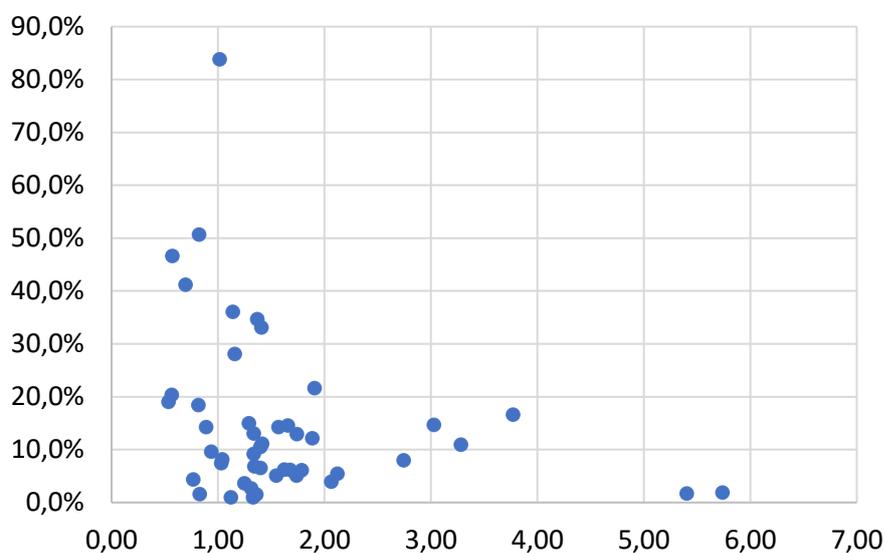


Рис. 3.2.4. Доля безвозвратных потерь советских войск в стратегических операциях (по материалам [76])

Также почти отсутствует зависимость между темпом боевого перемещения (км/сут) и соотношением сил (рис. 3.2.5).

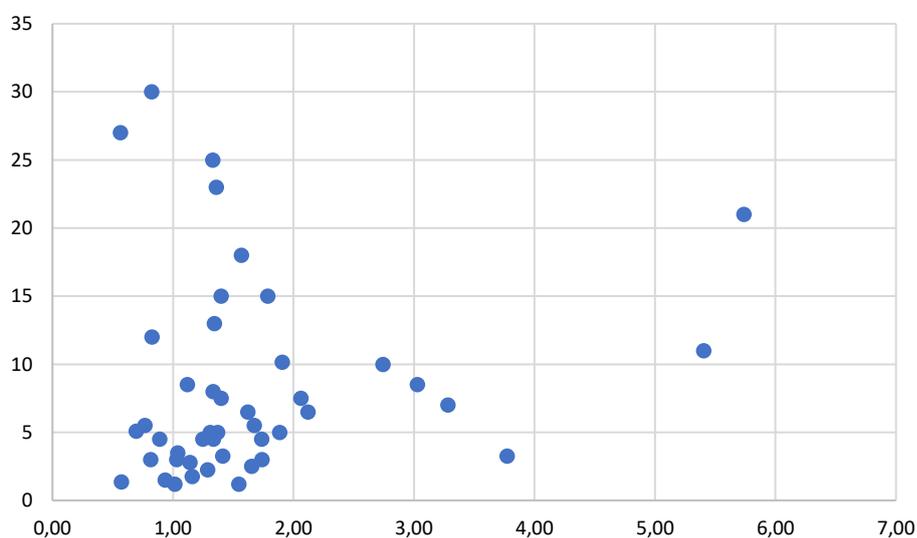


Рис. 3.2.5. Темп боевого перемещения советских войск в стратегических операциях в зависимости от соотношения сил (по материалам [76])

Для статистической оценки параметра масштаба воспользуемся методом максимального правдоподобия. Поскольку исходы сражения принимают только два значения ( $k_i = 1$  – победа или  $k_i = 0$  – поражение), то функция правдоподобия примет вид:

$$L(m) = \prod_{k_i=1} \frac{q_i^m}{q_i^m + 1} \prod_{k_i=0} \frac{1}{q_i^m + 1} = \prod_{k_i} \left( \frac{q_i^m}{q_i^m + 1} \right)^{k_i} \left( \frac{1}{q_i^m + 1} \right)^{1-k_i}. \quad (3.2.14)$$

Логарифмируя, получим

$$\begin{aligned} l(m) &= \sum_{i=1}^n k_i [m \ln q_i - \ln(q_i^m + 1)] - \sum_{i=1}^n (1 - k_i) \ln(q_i^m + 1) = \\ &= m \sum_{i=1}^n k_i \ln q_i - \sum_{i=1}^n \ln(q_i^m + 1). \end{aligned} \quad (3.2.15)$$

Взяв производную по  $m$  и приравняв ее к нулю, находим:

$$\sum_{i=1}^n k_i \ln q_i - \sum_{i=1}^n \frac{q_i^m \ln q_i}{q_i^m + 1} = 0. \quad (3.2.16)$$

Данное уравнение решается численно. Для сражений 1805-1905 гг. получим  $m \approx 3,7$ ; для стратегических операций Великой Отечественной войны –  $m \approx 2,7$ .

В связи с массовым внедрением в войска высокоточного оружия, увеличения эффективной дальности стрельбы артиллерии за счет применения активно-реактивных снарядов и использования беспилотных систем существенно выросли возможности дивизий и бригад по поражению противника в тактической и оперативной глубине. Увеличение глубины боевых действий на оперативном и стратегическом уровнях привело к качественному изменению характера сражений и операций, что явилось вызовом для военной науки и практики.

### 3.2.4. Функция победы и современные операции

В последние годы и десятилетия наблюдается «сетцентрическая лихорадка» (см., в частности, работы [25; 212; 215; 437], посвященные сетцентрическим войнам (от англ. Network-centric warfare)). Как и любая новая идея, концепция сетцентрической войны приобрела как горячих сторонников, так и противников. Сторонники с априори завышенными ожиданиями делали акцент на революционных изменениях, связанных с внедрением современных информационных технологий в управление войсками и оружием, настаивали на пересмотре (или дополнении) принципов ведения боевых действий, внедрении в теорию управления новых понятий и утверждений («нелинейные действия», «сетевое оперативное построение», «асимметричное превосходство над системами с классической древовидной структурой» и др.). Противники новой концепции, критикуя ее, зачастую игнорировали существенный рост боевых возможностей подразделений, частей и соединений за

счет внедрения современных систем связи, навигации, разведки, анализа и управления, в т. ч. в реальном времени.

В Большой российской энциклопедии дается следующее определение<sup>1</sup>: «Сетецентрическая война, концепция ведения войны, при которой все участники боевых действий (командование, военная техника, живая сила) объединены в единую информационную сеть. Концепция предполагает активное использование беспилотников, высокоточного оружия, хорошо защищённых устойчивых каналов связи с высокой пропускной способностью, а также широкое использование средств радиоэлектронной борьбы. В результате общая ситуационная осведомлённость позволяет обеспечивать необходимое сотрудничество и самосинхронизацию, повышает устойчивость и скорость передачи команд, позволяет наносить удары по противнику непрерывно и с дальних расстояний. Единого информационного центра в таких системах не существует. В эти системы внедряют элементы искусственного интеллекта, которые умеют работать с большими объёмами данных, проводить оперативно-тактические и иные расчёты, выявлять важные события и обращать на них внимание соответствующих должностных лиц. Эффективность таких боевых формирований определяется не столько индивидуальными характеристиками, сколько возможностями всей группы подключённых к сети средств как единого целого».

Для реализации создаваемых сетецентризмом возможностей сотрудничества (взаимодействия) и самосинхронизации подразделений и частей, и в связи с переориентацией армии США на ведение крупномасштабных боевых действий принято решение вернуться от нынешней организации на основе «модульных бригадных боевых групп» (автономных отдельных бригад с полным набором частей обеспечения и поддержки), к организации, основой которой будут дивизии постоянной организации с входящими в них бригадами строгой подчиненности и дивизионными частями обеспечения и поддержки [319].

Сетецентрические возможности повышают согласованность действий войск, а также степень поражения целей за счет сокращения цикла управления огнем и маневренные возможности за счет улучшения ситуационной осведомленности. Их учет возможен с помощью параметра боевого превосходства.

Полевой устав армии США 3-0 «Основы ведения операций» [413] не содержит упоминаний о сетецентрических войнах и операциях, в нем изложены классические принципы ведения боевых действий и делается акцент на многодоменных (или многосферных) операциях, проводимых армией США при поддержке объединенных сил.

---

<sup>1</sup> Сетецентрическая война. Опубликовано 25 января 2023 г. – URL: <https://bigenc.ru/c/setetsentricheskaia-voina-0458ab> (дата обращения – 10.01.2024).

Данные военной и международной статистики, содержательный анализ стратегических операций, выполненные здесь и ранее [391] расчеты показывают, что значение параметра масштаба функции победы меняется. В табл. 3.2.4 показано требуемое отношение сил сторон (превосходство первой стороны) для победы с заданной вероятностью, вычисляемое по формуле:

$$q = \sqrt[m]{P_x / (1 - P_x)} . \quad (3.2.17)$$

Таблица 3.2.4. Базовые показатели превосходства над противником

| Заданная вероятность победы $P_x$ | Тактический уровень         | Оперативный уровень | Стратегический уровень |
|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------|
|                                   | Боевые действия XX века     |                     |                        |
|                                   | $m=1$                       | $m=2$               | $m=3$                  |
| 0,7                               | 2,3                         | 1,5                 | 1,3                    |
| 0,75                              | 3,0                         | 1,7                 | 1,4                    |
| 0,8                               | 4,0                         | 2,0                 | 1,6                    |
| 0,9                               | 9,0                         | 3,0                 | 2,1                    |
|                                   | Современные боевые действия |                     |                        |
|                                   | $m=1$                       | $m=1-1,5$           | $m=1,5-2$              |
|                                   | 0,7                         | 2,3                 | 2,0                    |
| 0,75                              | 3,0                         | 2,4                 | 1,9                    |
| 0,8                               | 4,0                         | 3,0                 | 2,2                    |
| 0,9                               | 9,0                         | 5,8                 | 3,5                    |

Из таблицы видно, что ранее успех на оперативно-стратегическом уровне почти гарантированно достигался при соотношении сил 1,5 – 2,0 к 1. Изменения в вооружении и способах их применения привели к тому, что значения параметра масштаба на оперативном и стратегическом уровнях уменьшились. Следовательно, исходы сражений и операций становятся менее предсказуемыми, для гарантированной победы в них требуется обеспечить большее превосходство, чем ранее. Более того, как и век назад войны высокотехнологичных противников приобретают черты позиционности (за счет увеличения глубины боевых действий), вновь возникла проблема прорыва глубокоэшелонированной обороны.

### 3.2.5. Функция победы в специальных действиях

Одной из форм применения Вооруженных Сил России являются *специальные действия* войск (сил) – мероприятия проводимые специально назначенными, организованными, подготовленными и оснащенными силами, применяющими методы и способы боевых действий не характерные для обычных сил (разведывательно-диверсионные, подрывные, контртеррористи-

ческие, контрдиверсионные, контрразведывательные, партизанские, антипартизанские и другие действия)<sup>1</sup>.

Известно множество разновидностей специальных действий и операций. Укажем некоторые из них.

В теории оперативно-розыскной деятельности под специальной операцией по задержанию преступников понимается совокупность боевых действий и мероприятий оперативно-розыскного характера, направленных на задержание или ликвидацию преступников и осуществляемых специально сосредоточенными для решения этой задачи силами. Для проведения операции, в частности, создаются следующие группы [335]:

- группа блокирования – для изоляции определенного района;
- группа захвата или штурмовая группа;
- поисковая группа и др.

В пограничной сфере под специальными действиями понимается: 1) форма оперативно-служебной (служебно-боевой) деятельности, представляющая собой комплекс войсковых, оперативно-розыскных, режимных и других мероприятий, проводимых по единому замыслу и плану во взаимодействии с другими субъектами (компетентными органами), участвующими в охране государственной границы (осуществлении пограничной деятельности) и обеспечении пограничной безопасности государства, в целях поддержания установленного правопорядка на государственной границе и приграничной территории, режимов, определенных национальным законодательством, обеспечения собственной безопасности военнослужащих (сотрудников) пограничного ведомства в условиях чрезвычайных ситуаций, невооруженных провокаций, поиска и ликвидации ДРГ, незаконных вооруженных (иррегулярных) формирований; 2) форма пограничной деятельности, представляющая собой организованные действия подразделения пограничного ведомства по единому замыслу и плану в целях воспрепятствования незаконным массовым пересечениям государственной границы и локализации конфликтных ситуаций в пунктах пропуска [111].

Боевой порядок при действиях по ликвидации ДРГ может включать: группу прикрытия, группу поиска, огневую группу, атакующую группу и др.

Важнейшая особенность специальных действий – привлечение значительных сил и средств не столько для нейтрализации (захвата, уничтожения)

---

<sup>1</sup> Формы применения Вооруженных Сил Российской Федерации. – URL: <https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=14014@morfDictionary> (дата обращения – 30.01.2024).

противника, сколько для его поиска, защиты гражданских лиц и объектов и т. д. Если на тактическом уровне вероятность победы наступающих равна

$$P'_x = \frac{q}{q+1},$$

то при моделировании специальных действий и операций надо учитывать, что непосредственно задержанием (нейтрализацией) противника занята только часть сил. Долю этих сил обозначим  $0 < a < 1$ . Тогда вероятность победы первой стороны, планирующей специальные действия по борьбе с ДРГ противника, защите лиц и объектов, равна

$$P_x^a = \frac{aq}{aq+1}.$$

Из условия

$$\frac{aq}{aq+1} = \frac{q^m}{q^m+1}$$

можно найти значение параметра масштаба:

$$m = \frac{\ln(aq)}{\ln q}. \quad (3.2.18)$$

Например, при  $q = 4$  и  $a = 0,5$  получим  $m = 0,5$ , а при  $q = 5$  и  $a = 0,3$   $m = 0,25$ . Значение параметра  $m < 1$  отражает тот факт, что в нейтрализации противника задействованы только часть сил специальных действий.

Сведем полученные результаты в таблицу 3.2.5.

Таблица 3.2.4. Требуемое превосходство над противником в боевых действиях и специальных операциях

| Заданная вероятность победы $P_x$ | Специальные действия, $m = 0,5$ | Боевые действия              |                                    |                                       |
|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
|                                   |                                 | Тактический уровень, $m = 1$ | Оперативный уровень, $m = 1 - 1,5$ | Стратегический уровень, $m = 1,5 - 2$ |
| 0,7                               | 5,4                             | 2,3                          | 2,0                                | 1,6                                   |
| 0,75                              | 9,0                             | 3,0                          | 2,4                                | 1,9                                   |
| 0,8                               | 16,0                            | 4,0                          | 3,0                                | 2,2                                   |
| 0,9                               | 81,0                            | 9,0                          | 5,8                                | 3,5                                   |

Из таблицы 3.2.4 видно, что для победы над противником с вероятностью 0,75 на тактическом уровне требуется обеспечить трехкратное превосходство над противником, тогда как при ведении специальных действий уже требуется девятикратное превосходство. Данный результат подтверждается практикой контртеррористических и специальных операций: опыт внутренних конфликтов свидетельствует о том, что соотношение численности правительственных войск к повстанцам должно быть в пределах

(8–10) : 1 (восемь – десять единиц к одной). Многие государства Запада исходят именно из таких показателей при определении численности сил правопорядка [173].

По сравнению с тактическим уровнем на оперативном и стратегическом неопределенности исхода сражения (операции) при заданном соотношении сил снижаются. Этот вывод подтверждается военной наукой. Президент Академии военных наук генерал армии М.А. Гареев отмечал, что возможно отражение атак превосходящих сил противника в тактическом звене, но не в оперативно-стратегическом [152].

Таким образом, опираясь на закон поражения целей А. Н. Колмогорова и с использованием теории вероятностей строят функцию победы в бою (сражении, операции), которая может быть положена в основу оперативно-тактических расчетов при подготовке боевых и специальных действий, а также для обоснования боевого состава перспективных подразделений, частей и соединений, оценки боевого потенциала сторон.

Данные военной статистики позволяют сделать следующие выводы.

Концепция сетецентрической войны явилась следствием внедрения в вооруженные силы современных информационно-коммуникационных технологий и систем, которые повышают возможности боевых систем и ситуационную осведомленность на поле боя, сокращают время с момента обнаружения целей до их поражения. Эта концепция имеет технологический характер и не влияет на общие принципы и характер боевых действий. В интересах комплексной оценки боевых возможностей войск, существующих и перспективных образцов оружия, органов управления представляется целесообразным наряду с другими методами использовать и результаты расчета параметра боевого превосходства.

Увеличение глубины разведки, дальностей и точности поражения целей противника, а также повышение сетецентрических возможностей войск изменили парадигму современных общевойсковых (многосферных, многодоменных) операций. Эти изменения привели к результатам фундаментального характера: для достижения победы на оперативном и стратегическом уровне требуется обеспечить более высокое соотношение сил над противником и адекватное техническое противодействие; за счет увеличения глубины боевых действий темпы наступления снизились, бои и операции приобрели черты позиционности.

Таким образом, рассмотрены производственные функции, применяемые в задачах анализа и прогноза безопасности, и функция победы в боевых и специальных действиях, применяемая на этапе подготовки действий. Далее

исследуем агрегированные функции, используемые в задачах планирования охраны границы.

### 3.3. Агрегированные функции в задачах охраны границы

Агрегированные функции в задачах охраны границы предназначены для обоснования рациональных плотностей пограничных сил и средств на уровне региона и выше. Агрегирование возможностей подразделений выполняется методами математической статистики по результатам оперативно-служебной деятельности.

#### 3.3.1. Функция задержания нарушителей

На основе анализа результатов охраны границы СССР в 1960-1980 гг. и охраны американо-мексиканской границы в 1980-2011 гг. (см. табл. 3.3.1) получена [109] статистически значимая агрегированная функция задержания (отражающая зависимость вероятности задержания нарушителей границы от плотности ее охраны в регионе):

$$p_z = 1 - \exp(-\lambda x), \quad (3.3.1)$$

где:  $\lambda$  – параметр распределения;  $x$  – плотность охраны границы (количество личного состава подразделений охраны, включая резервы и обеспечивающие подразделения на 1 км границы).

Таблица 3.3.1. Возможности и результаты деятельности таможенной и пограничной службы США на границе с Мексикой (вне пунктов пропуска)

| Год  | Пограничников на границе с Мексикой | Плотность охраны, пограничников/км | Вероятность задержания, MMFRP* |
|------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| 1980 | 2500                                | 0,79                               | 0,25                           |
| 1981 | 2500                                | 0,79                               | 0,22                           |
| 1982 | 2600                                | 0,83                               | 0,27                           |
| 1983 | 2600                                | 0,83                               | 0,28                           |
| 1984 | 2600                                | 0,83                               | 0,27                           |
| 1985 | 3000                                | 0,95                               | 0,31                           |
| 1986 | 3100                                | 0,99                               | 0,34                           |
| 1987 | 3100                                | 0,99                               | 0,31                           |
| 1988 | 3900                                | 1,24                               | 0,33                           |
| 1989 | 3900                                | 1,24                               | 0,33                           |
| 1990 | 3800                                | 1,21                               | 0,32                           |

| Год  | Пограничников на границе с Мексикой | Плотность охраны, пограничников/км | Вероятность задержания, MMFRP* |
|------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| 1991 | 3900                                | 1,24                               | 0,32                           |
| 1992 | 4100                                | 1,30                               | 0,37                           |
| 1993 | 4100                                | 1,30                               | 0,4                            |
| 1994 | 4500                                | 1,43                               | 0,43                           |
| 1995 | 4800                                | 1,53                               | 0,45                           |
| 1996 | 5500                                | 1,75                               | 0,52                           |
| 1997 | 6500                                | 2,07                               | 0,5                            |
| 1998 | 7500                                | 2,38                               | 0,5                            |
| 1999 | 8000                                | 2,54                               | 0,5                            |
| 2000 | 8500                                | 2,70                               | 0,49                           |
| 2001 | 9000                                | 2,86                               | 0,45                           |
| 2002 | 9239                                | 2,94                               | 0,43                           |
| 2003 | 9500                                | 3,02                               | 0,44                           |
| 2004 | 9400                                | 2,99                               | 0,43                           |
| 2005 | 10000                               | 3,18                               | 0,43                           |
| 2006 | 11000                               | 3,50                               | 0,47                           |
| 2007 | 13000                               | 4,13                               | 0,54                           |
| 2008 | 15500                               | 4,93                               | 0,55                           |
| 2009 | 17000                               | 5,41                               | 0,55                           |
| 2010 | 17000                               | 5,41                               | 0,56                           |
| 2011 | 18400                               | 5,85                               | 0,58                           |

\* MMFRP – Mexican Migration Field Research Program

Содержательно параметр  $\lambda$  отражает: 1) искусство руководителей применять пограничные силы и средства; 2) возможности типовых нарушителей границы; 3) физико-географические и иные условия.

В предположении, что вектор ошибок линейной регрессии распределен нормально с нулевым математическим ожиданием, значения параметра  $\lambda$  можно оценить методом наименьших квадратов. Результаты оценки показаны в табл. 3.3.2.

Таблица 3.3.2. Значения параметра функции задержания

| Категория нарушителей        | Неподготовленные нарушители | Подготовленные нелегальные мигранты | Подготовленные контрабандисты |
|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Значение параметра $\lambda$ | 0,3-0,4                     | 0,2–0,25                            | 0,18–0,2                      |

На рис. 3.3.1 для трех категорий нарушителей (и только для них, в силу массовости именно этих категорий) показаны вероятности их задержания в зависимости от плотности охраны границы.

Из (3.3.1) находим выражение для вычисления требуемой плотности  $X_r$  охраны границы:

$$X_r = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - P_r), \quad (3.3.2)$$

где  $P_r$  – требуемая вероятность задержания нарушителей границы.

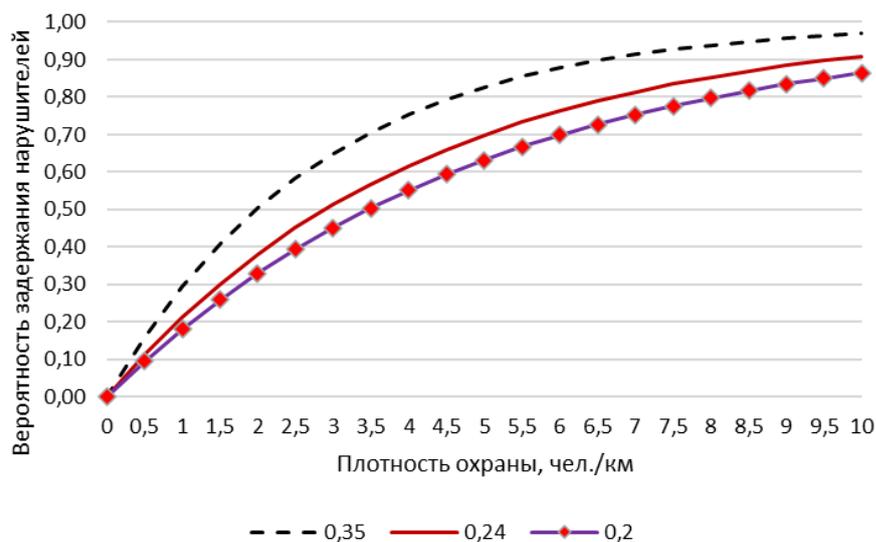


Рис. 3.3.1. Зависимость вероятностей задержания нарушителей от плотности охраны границы

В табл. 3.3.3 показаны необходимые плотности охраны границы в зависимости от назначенной вероятности задержания нарушителей.

Таблица 3.3.3. Необходимые плотности охраны границы, чел./км

| Требуемая вероятность задержания | Категория нарушителей       |                                     |                               |
|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
|                                  | Неподготовленные нарушители | Подготовленные нелегальные мигранты | Подготовленные контрабандисты |
| 0,2                              | 0,6 – 0,7                   | 0,9 – 1,1                           | 1,1 – 1,2                     |
| 0,3                              | 0,9 – 1,2                   | 1,4 – 1,8                           | 1,8 – 2,0                     |
| 0,4                              | 1,3 – 1,7                   | 2,0 – 2,6                           | 2,6 – 2,8                     |
| 0,5                              | 1,7 – 2,3                   | 2,8 – 3,5                           | 3,5 – 3,9                     |
| 0,6                              | 2,3 – 3,1                   | 3,7 – 4,6                           | 4,6 – 5,1                     |
| 0,7                              | 3,0 – 4,0                   | 4,8 – 6,0                           | 6,0 – 6,7                     |
| 0,8                              | 4,0 – 5,4                   | 6,4 – 8,0                           | 8,0 – 8,9                     |
| 0,9                              | 5,8 – 7,7                   | 9,2 – 11,5                          | 11,5 – 12,8                   |

### 3.3.2. Функция пограничного контроля

По данным о пересечении американо-мексиканской границы<sup>1</sup> и сведениям о численности персонала построена зависимость пропускаемых через границу лиц и транспорта (в среднем за год) в автомобильных пунктах

<sup>1</sup> US Border Crossing Data. – URL: <https://www.kaggle.com/datasets/divyansh22/us-border-crossing-data> (дата обращения – 09.02.2024).

пропуска от численности персонала этих пунктов (рис. 3.3.2). Группировка выполнена по штатам. Данные о пропуске взяты за 2015 – 2019 гг.

Коэффициент корреляции между двумя наборами данных равен 0,90.

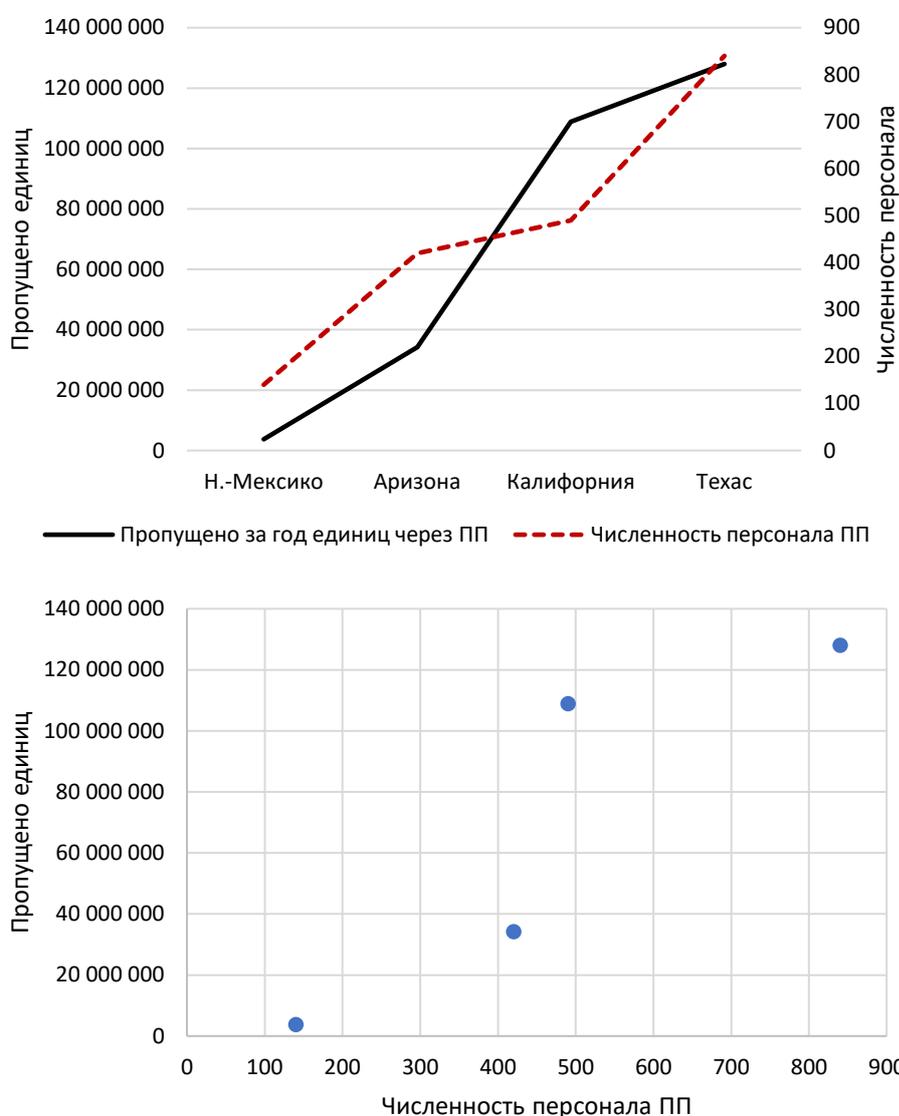


Рис. 3.3.2. Зависимость пропуска через границу лиц и транспортных средств от численности персонала в автомобильных пунктах пропуска

Характер зависимости пропускаемых через границу единиц от численности персонала в пунктах пропуска не изменится, если анализировать поток лиц и транспорта через границу не в среднем за год, а в месяц максимальной интенсивности движения (как правило, это июль).

Данные пограничной статистики дают основания предположить, что возможности по пропуску через границу лиц и транспортных средств у подчиняются линейному закону:

$$y = \begin{cases} k_r x, & x \geq x_0, \\ 0, & x < x_0, \end{cases} \quad (3.3.3)$$

где:  $k_r$  – коэффициент, отражающий технологические возможности пунктов пропуска, характер потока лиц и транспорта, действующие правила по их проверке;  $x_0$  – минимально возможная штатная (фактическая) численность персонала в пункте пропуска;  $x$  – штатная (фактическая) численность персонала в пункте пропуска.

Таким образом, функция пограничного контроля в условиях действующих правил и технологии задает максимально возможный обслуживаемый поток лиц и грузов через границу (по видам пунктов пропуска) одной штатной единицей пункта пропуска. Функция пограничного контроля предназначена для решения двух задач. Во-первых, сравнение значений функции с фактически обслуживаемым потоком показывает степень загрузки пунктов пропуска, напряженность их работы. Во-вторых, функция пограничного контроля позволит более обоснованно и своевременно решать задачи перераспределения персонала между пунктами пропуска в условиях резких изменений обстановки. Анализ и прогноз динамики потоков лиц и грузов через границу также позволит обосновать для каждого региона потребный резерв обученного персонала.

### **3.4. Функции социально-информационного влияния**

Рациональные субъекты выбирают альтернативы на основе целевой функции или функции полезности [252; 258]. На их выбор оказывает влияние социальная среда. Рассмотрим типовые модели ожидаемой полезности и одну из частных моделей, позволяющей учесть социальные и информационные воздействия на индивидов и лиц, принимающих решения.

#### ***3.4.1. Модели ожидаемой полезности***

Поиск оптимальных (рациональных) решений основан на тех или иных процедурах над функциями полезности (целевыми функциями). Конкретный вид функции определяется используемой моделью ожидаемой полезности.

Модели ожидаемой полезности изучают выбор между рисковыми перспективами как с одним, так и с несколькими возможными исходами.

Рисковой перспективой называется декартово произведение векторов исходов  $x = (x_1, \dots, x_n)$  и вероятностей наступления каждого из них  $p = (p_1, \dots, p_n)$ , причем  $\sum_{i=1}^n p_i = 1$  [380].

С появлением первых работ по теории вероятностей (Б. Паскаль, Х. Гюйгенс) полагалось, что наилучший выбор – тот, которому соответствует наибольшее значение математического ожидания денежного выигрыша. Наивный подход, что полезность богатства равна (или пропорциональна) его величине, при анализе поведения экономических субъектов в условиях риска приводит к парадоксальным выводам, на что обратил внимание Д. Бернулли (1700–1782) в своей статье «Опыт новой теории измерения жребия», опубликованной в 1738 г. [49].

Им рассмотрен следующий пример. Некий купец закупил в Амстердаме товары, которые он может продать в Санкт-Петербурге за 10 тыс. руб. После оплаты перевозки товара у него еще осталось 5 тыс. руб. Известно, что с вероятностью 0,05 груз погибнет, а с вероятностью 0,95 – благополучно дойдет до цели. Купец решает, надо ли страховать ему груз. В табл. 3.4.1 показаны значения имущества купца при страховании ( $z$  – размер страхового платежа) и без оного.

Таблица 3.4.1. Имущество купца, тыс. руб.

| Случай          | Вероятность | Без страхования | При страховании |
|-----------------|-------------|-----------------|-----------------|
| Благоприятный   | 0,95        | 15              | $15 - z$        |
| Неблагоприятный | 0,05        | 5               | $15 - z$        |

Математическое ожидание величины имущества без страхования равно 14,5. Если имущество застраховано, то его величина не случайна и равна  $15 - z$ . Купцу выгодно страховать груз при условии  $15 - z > 14,5$  или  $z < 0,5$ . В табл. 3.4.2 показан доход страховщика.

Таблица 3.4.2. Доход страховщика, тыс. руб.

| Случай          | Вероятность | Без страхования | При страховании |
|-----------------|-------------|-----------------|-----------------|
| Благоприятный   | 0,95        | 0               | $z$             |
| Неблагоприятный | 0,05        | 0               | $z - 10$        |

Математическое ожидание дохода страховщика равно  $z - 0,5$ ; страховщику выгодно заключить сделку с купцом при условии  $z > 0,5$ .

Из расчетов видно, что в принятых предположениях сделка по страхованию невозможна ни при какой величине страхового платежа. Лишь при  $z = 0,5$  никто из них ничего не выигрывает и не проигрывает. Но это утверждение

справедливо лишь при отсутствии трансакционных затрат и нейтральном отношении обеих сторон к риску.

Итак, предположив, что субъекты выбирают вариант, дающий наибольшее математическое ожидание денежного дохода или размера имущества, приходим к выводу о невозможности страхования. Но страхование все-таки существует.

Первый вывод из рассмотренного примера – люди по-разному ведут себя в ситуациях риска. Одни из них – рисконейтралы, вторые – рискофобы (не склонны к риску, стремятся по возможности избегать рискованных ситуаций или максимально обезопаситься от риска), третьи – рискофилы (склонны к риску, для них рискованный вариант поведения предпочтительнее безрискового с тем же самым математическим ожиданием успеха). Для учета отношений индивидов к риску вводится функция полезности<sup>1</sup>. Для рискофилов она выпукла, для рискофобов вогнута, а для рисконейтралов линейна.

Д. Бернулли решает парадокс следующим образом. Если  $w$  – величина богатства, а  $U(w)$  – его полезность, то предельная полезность<sup>2</sup> богатства  $dU(w)/dw$ , обратно пропорциональна величине богатства, так что  $U(w) = k \ln(w)$ . В этом случае можно найти размер страхового платежа, удовлетворяющий купца:

$$0,95k \ln 15 + 0,05k \ln 5 < k \ln(15 - z),$$

или

$$15^{0,95} \cdot 5^{0,05} < 15 - z,$$

откуда  $z < 0,8$ . Если страховщик располагает суммой 50 тыс. руб., то его устроит величина страхового взноса  $z > 0,56$ .

Интуитивно понятно, что Д. Бернулли мог бы использовать не логарифмическую функцию полезности  $U(w)$ , а некоторую функцию, зависящую от вероятности. Известны как минимум четыре концепции вероятности и пределы возможностей каждой из них [380].

Первая концепция – классическая (П. Лаплас), вероятность определяется как число благоприятных исходов, отнесенное к числу всех равновозможных элементарных исходов.

Вторая концепция – вероятность по А. Н. Колмогорову (благодаря аксиоматике Колмогорова теория вероятностей приобрела строгий математический вид и окончательно стала восприниматься как один из разделов математики). В этой концепции (как, впрочем, и в других) не всегда понятно,

<sup>1</sup> Функция полезности (ценности и т. д.) строится на основе аксиом или экспериментально, как результат анализа поведения людей в конкретных ситуациях риска.

<sup>2</sup> В экономике предельной полезностью называют производную функции полезности.

что следует считать пространством возможных исходов. Например, при анализе авиакатастроф следует ли брать все предыдущие полеты, или только на данном маршруте, на этом типе самолета, в это время года и т. д.

Третья концепция – концепция логической школы Дж. Кейнса и Г. Джеффриса: каждое множество эмпирических данных находится в логическом, объективном отношении к истинности некоторой гипотезы (например, о виновности кого-либо), даже если эти данные сами по себе не позволяют прийти к определенным выводам. Вероятность измеряет силу этой связи с точки зрения рационального индивида.

Четвертая концепция – субъективная концепция вероятности, в соответствии с которой вероятность  $f(p)$  – это степень убежденности в том, что наступят те или иные события – как повторяющиеся, так и уникальные.

В таблице 3.4.3 представлены варианты моделей ожидаемой полезности в условиях риска [380].

Таблица 3.4.3. Модели ожидаемой полезности в условиях риска

| № | Модель               | Описание модели                                       |
|---|----------------------|---|
| 1 | $\sum p_i x_i$       | Ожидаемый выигрыш                                     |
| 2 | $\sum p_i v(x_i)$    | Ожидаемая полезность по Д. Бернулли                   |
| 3 | $\sum p_i u(x_i)$    | Ожидаемая полезность фон Неймана – Morgenштерна [243] |
| 4 | $\sum f(p_i) x_i$    | Теория достоверных эквивалентов [555; 469]            |
| 5 | $\sum f(p_i) v(x_i)$ | Субъективная ожидаемая полезность [451]               |
| 6 | $\sum f(p_i) u(x_i)$ | Субъективная ожидаемая полезность [553; 538]          |
| 7 | $\sum w(p_i) v(x_i)$ | Теория перспектив [494]                               |
| 8 | $\sum w(p_i) u(x_i)$ | Субъективная взвешенная полезность [497]              |

Примечание.  $v(x)$  означает интервальную меру полезности, построенную для случая определенных исходов,  $u(x)$  – интервальную меру полезности для исходов лотерей.

Выделяют следующие функции моделей вообще и моделей ожидаемой полезности в частности:

- дескриптивная (описательная) и объяснительная функции;
- предсказательная функция (в соответствии с критерием демаркации К. Поппера требуется априорное определение, какие возможные эмпирические результаты поддерживают теорию, а какие – опровергают);
- предписывающая (нормативная) функция.

Далее рассмотрим одну из возможных моделей ожидаемой полезности, позволяющую учесть социально-информационные воздействия.

### 3.4.2. *Функции социально-информационного влияния*

Индивид принимает те или иные решения, опираясь на картину мира – совокупность предметного содержания, которым обладает человек в своем сознании, а также с учетом характеристик структуры и воззренческих форм направленности личности (см. [256]).

С точки зрения деятельностного подхода можно сказать, что формой готовности человека к активной познавательной деятельности во внешнем мире выступают *представления* – чувственно-наглядные образы предметов и явлений действительности, свободно сохраняемые и воспроизводимые в сознании без непосредственного воздействия самих предметов и явлений на органы чувств [246, т. 3].

Субъективная картина мира формируется и на основе *восприятия* – чувственного познания предметов и объективных ситуаций. Для восприятия характерно специфическое переживание прямого контакта с реальным миром [246, т. 1]. Однако личный опыт индивида с точки зрения получения необходимой информации для выбора альтернатив ограничен: для получения нужной информации требуется много времени или ресурсов. Последствия некоторых решений нельзя проверить на собственном опыте в силу различных причин (угроза потери здоровья и т. д.). К тому же реальные действия индивида происходят в условиях нехватки времени, в силу чего человек обращается к опыту других индивидов, ищет информацию, чтобы спрогнозировать последствия выбора альтернатив.

При выборе альтернатив индивид дополнительно подвержен внешним информационным воздействиям со стороны СМИ, социальных сетей, экспертов и т. д. Объективно существующая у людей потребность в информации используется многими субъектами и организациями в своих целях. На эту потребность опираются PR-акции и информационные войны. Политолог В. Т. Третьяков так описывает технологию современных информационных войн: «Пиарщики не только просочились в редакции и штабы политических партий, они влезли и в военные штабы – встали в один ряд с генералами во время любой современной войны. А точнее, сначала в бой идут пиарщики, создавая правильный образ: кто прав, а кто – враг человечества; потом на их плечах политики вырываются вперед, отдавая приказы генералам; а те в свою очередь решают военные задачи в соответствии с теми целями, гуманность которых пиарщики уже доказали общественному мнению. PR и СМИ играют решающую роль в победе, поскольку победа – это достижение политической задачи, а военная сила – только одно из средств» [341, с. 16].

Эффективность информационных воздействий тесно связана как со средствами массовой и групповой коммуникации, так и с особенностями деятельности индивида, на которого направлены воздействия. По Б. А. Грушину эффективность средств массовой информации (СМИ) есть степень достижения целей на базе использования тех или иных средств и ресурсов. Конечная эффективность деятельности СМИ складывается из эффективностей, характеризующих следующие стадии деятельности: целеполагание, производство информации, тиражирование и передача информации, воздействие на потребителя информации [121].

Принимая то или иное решение, индивид строит модель (адаптирует картину мира) для оценки последствий решения, используя в качестве неотъемлемой части модели множество показателей и параметров – выраженных числом характеристик какого-либо объекта или процесса. Рассмотрим множество  $\Omega = \{\theta_1, \dots, \theta_n\}$  непрерывных ограниченных показателей, выраженных в количественной шкале: вероятность победы, ожидаемый доход, степень важности тех или иных целей и т. д. Предположим, что возможные значения показателей  $\theta_j, j = 1, \dots, n$ , используемых индивидами при выборе альтернатив, ограничены, непрерывны и являются подмножеством действительной оси:  $\theta_j \in \Omega_R \subseteq \mathbb{R}^1$ . Далее будем рассматривать некоторый конкретный показатель, опуская индекс  $j$ .

Показатели разделим на два типа: вероятностные (вероятность победы, степень важности цели и др.) и интервальные (ожидаемый доход, цена товара и др.).

Для учета воздействий на индивида определим **функцию представления (восприятия)**  $V(y, x, \theta) = V(\theta)$  о показателе  $\theta \in [\theta_0, \theta_1]$  (вероятности  $\theta \in [0, 1]$ ) в условиях воздействий  $y \geq 0$  ( $x \geq 0$ ), направленных на увеличение (уменьшение) представления о значении показателя, как функцию вида:

$$V(\cdot): [\theta_0, \theta_1] \rightarrow [\theta_0, \theta_1]. \quad (3.4.1)$$

Под социализацией понимается процесс усвоения индивидом образцов поведения, психологических установок, социальных норм и ценностей, знаний, навыков, позволяющих ему успешно функционировать в обществе.

*Гипотеза социализации:* индивид подвержен внешним воздействиям, которые по содержанию, как правило, являются психологическими воздействиями и направлены на конкретные сферы психики: потребностно-мотивационную, интеллектуально-познавательную, эмоционально-волевою и коммуникативно-поведенческую [218].

Пусть на индивида направлены воздействия двух типов: воздействия  $y \geq 0$  с целью увеличения представления о показателе и воздействия  $x \geq 0$  с целью уменьшения. На основании гипотезы социализации положим:

$$\forall y_2 > y_1: B(y_2, x, \theta) \geq B(y_1, x, \theta); \forall x_2 > x_1: B(y, x_2, \theta) \leq B(y, x_1, \theta). \quad (3.4.2)$$

*Гипотеза рациональности:* когнитивные возможности индивида позволяют ему в отсутствии временных и ресурсных ограничений получить представление о значении показателя, совпадающее с объективным значением этого показателя. Иными словами, в отсутствии внешних воздействий функция представления о показателе совпадает со значением этого показателя:

$$B(0, 0, \theta) = \theta. \quad (3.4.3)$$

*Гипотеза индивидуального выбора:* в условиях однонаправленных воздействий индивид способен предпринять дополнительные меры с целью получения недостающей (с точки зрения индивида) информации или опыта.

Рассмотрим две компоненты функции представления:  $B_+(y, \theta)$  – учитывает воздействия, направленные на увеличение значения представления и  $B_-(x, \theta)$  – на уменьшение, причем  $B_+(0, \theta) = \theta$ ,  $B_-(0, \theta) = \theta$  и выполняются неравенства:

$$\forall y_2 > y_1: B_+(y_2, \theta) \geq B_+(y_1, \theta); \forall x_2 > x_1: B_-(x_2, \theta) \leq B_-(x_1, \theta). \quad (3.4.4)$$

Определим функцию представления индивида в условиях разнонаправленных воздействий по формуле:

$$B(y, x, \theta) = \alpha B_+(y, \theta) + (1 - \alpha) B_-(x, \theta), \quad (3.4.5)$$

где  $0 < \alpha < 1$  – параметр, позволяющий учесть степень усвоения индивидом воздействий определенной направленности. Параметр  $\alpha$  зависит от психологических свойств индивида и характеризует степень пессимизма-оптимизма (от лат. *optimus* – наилучший и *pessimus* – наихудший). В философии и психологии понятия оптимизм и пессимизм характеризуют ту или иную систему представлений о мире с точки зрения выраженного в ней позитивного или негативного отношения к сущему и ожиданий от будущего [355]. В теории игр (игры с природой) формула (3.4.5) соответствует критерию пессимизма-оптимизма Гурвица [79].

Для «оптимистов» положим, что параметр  $\alpha > 0,5$ , тогда как для «пессимистов» –  $\alpha < 0,5$ . Если позитивные и негативные отношения у индивида равновесны (нейтральный индивид), то положим  $\alpha = 0,5$ . Из формулы (3.4.5) следует, что

$$B(y, 0, \theta) \leq B_+(y, \theta) \quad (3.4.6)$$

и

$$B(0, x, \theta) \geq B_-(x, \theta). \quad (3.4.7)$$

Содержательно последние неравенства объясняются тем, что индивид предпримет дополнительные личные усилия для компенсации недостающей информации.

*Гипотеза комплексности информационных воздействий.* Индивид постоянно находится в условиях воздействий (гипотеза социализации) со стороны различных субъектов управления. Эти воздействия реализуются средствами массовой, групповой и индивидуальной коммуникации с использованием различных каналов передачи информации. Комплексность предполагает выполнение следующих функций (функции журналистики по В. Т. Третьякову): информационная, коммуникативно-интеграционная, vox populi (гласа народа), политическая, историографическая, развлекательная функции, функция социализации людей [341, с. 94].

Управление индивидами может осуществляться открыто и скрытно, путем воздействий специализированного или общего вида. Пример специализированного воздействия – передача информации об успешных (неуспешных) действиях полиции по раскрытию преступлений или задержанию преступников. Пример воздействия общего типа – стихотворение А.С. Пушкина «Клеветникам России», вызвавшее массовый патриотический подъем в армии и обществе.

Заметим, что в качестве единицы измерения величин  $y$  и  $x$  может использоваться не только среднесуточное время, но и средневзвешенное (относительное) количество доступных сообщений или (относительные) расходы на информационные воздействия.

*Гипотезы динамики представлений и восприятий.* В соответствии с основным психофизическим законом в форме С. Стивенса сила ощущения (реакция)  $R$  имеет степенную зависимость от интенсивности раздражителя:

$$R = kS^v, \quad (3.4.8)$$

где:  $S$  – значение интенсивности раздражителя (стимула),  $k > 0$  – константа, зависящая от единицы измерения;  $v$  – показатель степени, зависящий от модальности ощущений, изменяется в пределах от 0,3 (для громкости звука) до 3,5 (для силы электрического удара).

Для показателей вероятностного типа (с известной функцией распределения) предположим, что изменение представления (восприятия)  $B_+(\cdot)$  подчиняется психофизическому закону и стремится к нулю при  $\theta = 0$  и  $\theta = 1$ . Содержательно данное предположение означает: представления индивидов, близкие к 0 или 1, очень трудно изменить (устойчивые мнения), тогда как представления, близкие к 0,5, изменяются относительно легко (неустойчивые

мнения). Иными словами, достоверное (невозможное) событие остается таковым в условиях социально-информационных воздействий.

Тогда для воздействий  $y \geq 0$ , направленных на увеличение значения представления (восприятия), получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dB_+}{dy} = k_y y^\nu B_+ (1 - B_+), \quad (3.4.9)$$

где:  $k_y \geq 0$  – коэффициент эффективности (качества) воздействий;  $\nu \geq 0$  характеризует модальность воздействия. Коэффициент  $k_y$  в значительной степени определяется комплексностью воздействий.

Сомножители  $B_+(1 - B_+)$  в правой части уравнения (3.4.9), во-первых, обеспечивают выполнение равенства  $B_+(\cdot) = 0$  для невозможных событий и равенства  $B_+(\cdot) = 1$  для достоверных; во-вторых, сомножитель  $(1 - B_+)$  имеет технический характер – он обеспечивает невыход за границы области значений функции.

Соответственно, для воздействий  $x \geq 0$ , направленных на снижение значения представления (восприятия), получим:

$$\frac{dB_-}{dx} = -k_x x^\nu B_- (1 - B_-), \quad (3.4.10)$$

где  $k_x \geq 0$  – коэффициент эффективности воздействий, направленных на снижение значений представления (восприятия);  $\nu$  – параметр модальности.

Для непрерывных показателей интервального типа  $\theta$ , принимающих значения на отрезке  $\theta_0 \leq \theta \leq \theta_1$ , предположим: изменение представления (восприятия)  $D(\cdot)$  подчиняется психофизическому закону и стремится к нулю при  $\theta \rightarrow \theta_0$  (воздействия направлены на снижение представления) или при  $\theta \rightarrow \theta_1$  (воздействия направлены на увеличение представления). Тогда для воздействий  $y \geq 0$  ( $x \geq 0$ ), направленных на увеличение (снижение) значения представления (восприятия), получим:

$$\frac{dD_+}{dy} = k_y y^\nu (\theta_1 - D_+), \quad (3.4.11)$$

$$\frac{dD_-}{dx} = -k_x x^\nu (D_- - \theta_0). \quad (3.4.12)$$

Для показателей интервального типа не существуют такие понятия, как функция распределения, достоверные и невозможные события. Отметим, что в случае адаптации сложных систем (процесс приспособления к изменяющимся условиям внешней среды; строение и функции системы из статических

превращаются в динамические) некоторые показатели могут переходить из вероятностных в интервальные.

*Гипотеза доступности Дж. Цаллера* – чем ближе по времени данное представление было актуализовано, обсуждалось или обдумывалось, тем меньше времени требуется для актуализации этого и аналогичных представлений в памяти, сознании [357]. Иными словами, со временем происходит забывание информации.

Решения уравнений (3.4.9 – 3.4.12):

$$B_+(y, \theta) = \frac{\theta \exp(z_y)}{1 - \theta + \theta \exp(z_y)}, \quad z_y = \frac{k_y}{\nu + 1} y^{\nu+1}, \quad (3.4.13)$$

$$B_-(x, \theta) = \frac{\theta \exp(-z_x)}{1 - \theta + \theta \exp(-z_x)}, \quad z_x = \frac{k_x}{\nu + 1} x^{\nu+1}, \quad (3.4.14)$$

$$D_+(y, \theta) = \theta_1 - (\theta_1 - \theta) \exp(-z_y), \quad (3.4.15)$$

$$D_-(x, \theta) = \theta_0 + (\theta - \theta_0) \exp(-z_x). \quad (3.4.16)$$

На рис. 3.4.1 показан график функции представления (восприятия) для показателя вероятностного типа при  $\alpha = 0,5$  и различных значениях  $z = z_x = z_y$  (1; 2 и 5).

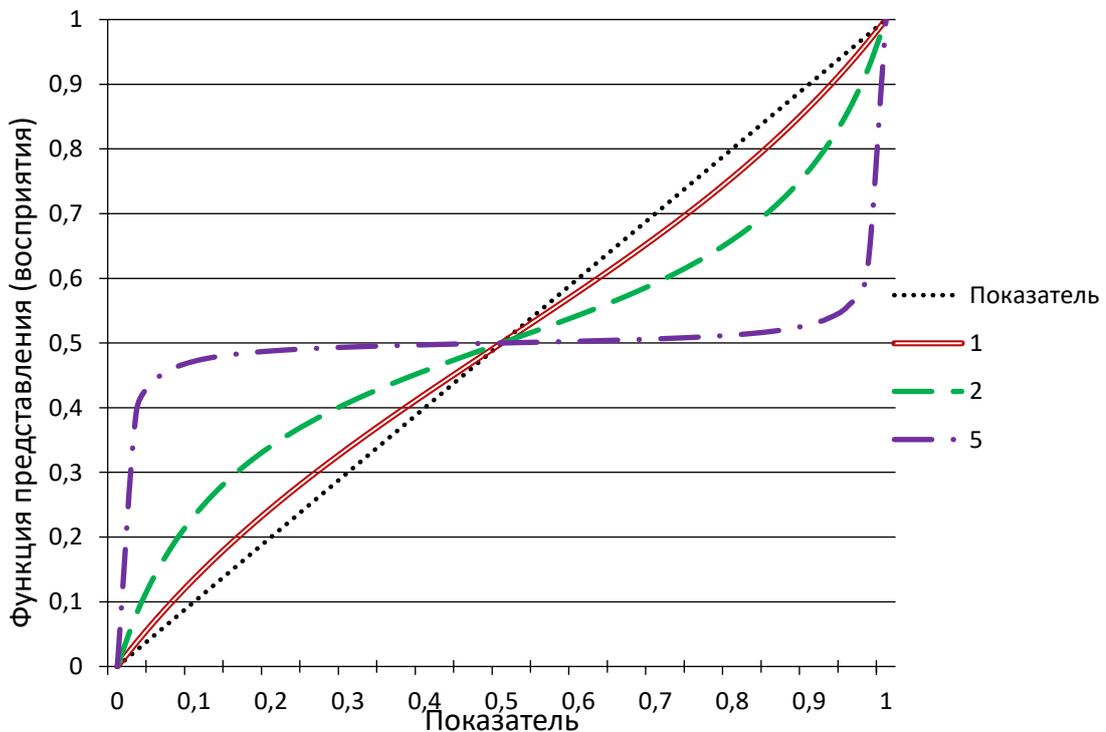


Рис. 3.4.1. График функции представления (восприятия), показатель вероятностного типа

При  $z = 0$  график функции совпадает со значением показателя. Функция представления (восприятия) о показателе вероятностного типа, являясь элементом нормативной модели, позволяет теоретически объяснить характер экспериментально полученных в теории перспектив графиков весовых функций (преувеличение индивидами малых вероятностей и преуменьшение больших).

На рис. 3.4.2 при значениях параметров:  $y = 1,2$ ;  $x = 1,2$ ;  $k_y = k_x = 1$ ;  $\theta_0 = 0$ ;  $\theta_1 = 1$ ;  $\nu = \nu = 0$  и для трех значений степени оптимизма ( $\alpha = 0,25$ ;  $\alpha = 0,5$ ;  $\alpha = 0,75$ ) показаны графики представлений (восприятий) об интервальном показателе.

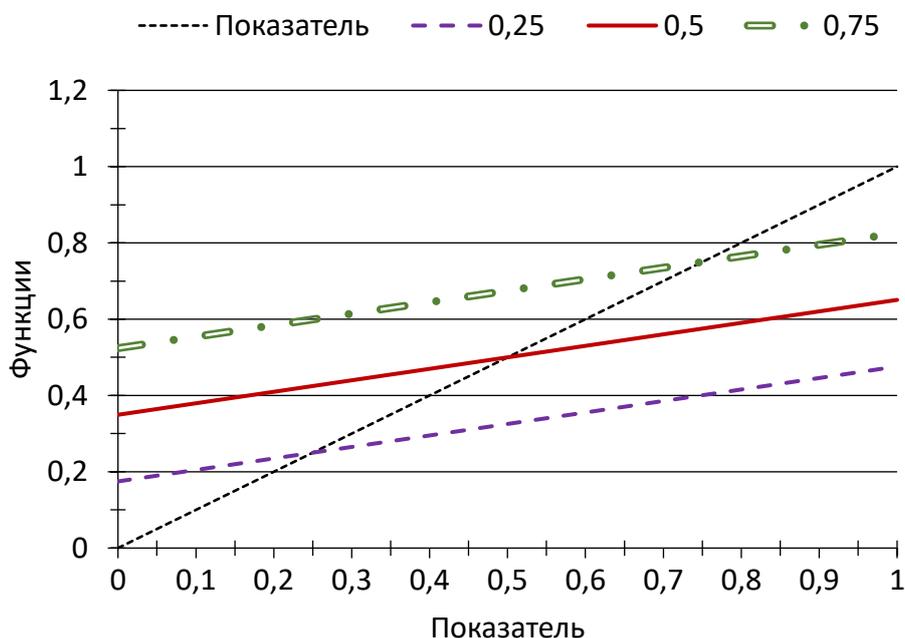


Рис. 3.4.2. График функции представления (восприятия), показатель интервального типа

График «0,25» характерен для индивидов, склонных к некритическому восприятию воздействий, направленных на снижение представления (пессимисты). Соответственно, график «0,75» – для индивидов, склонных к некритическому восприятию воздействий, направленных на увеличение представления (оптимисты). График «0,5» характерен для рисконейтралов.

Пояснения по виду графика можно дать следующим примером. Допустим, что у индивида есть оценка значения некоторого показателя  $\theta = m/n$ , где  $m$  есть количество опытов (свидетельств) с благоприятным исходом, а  $n$  – общее количество опытов. Предположим, два субъекта управления посылают по  $k$  порций информации: первый о благоприятных исходах, второй – о неблагоприятных. Получив сообщение о благоприятном исходе, индивид добавляет единицу в числитель и знаменатель, о неблагоприятном только в знаменатель.

Тогда представление индивида в условиях информационных воздействий будет равно:

$$D(m/n) = \frac{m+k}{n+2k}.$$

Получили уравнение прямой (при фиксированных  $n, k$ ) и изменении  $m$  от 0 до  $n$ , график которой выше графика показателя при  $m < n/2$  и ниже при  $m > n/2$ .

Если значения функции представления (восприятия) для вероятностных показателей равны нулю (единице) для невозможных (достоверных) событий, то функции представления (восприятия) для интервальных показателей отражают процесс формирования субъективных вероятностей в условиях внешних воздействий.

Соответственно, субъективная вероятность, под которой понимается субъективная мера уверенности, основанная на всей имеющейся информации, является результатом процесса представления (восприятия) и вместе с тем, может выступать в качестве параметра функции представления (восприятия) о показателе вероятностного типа.

Рассматривая поведение субъекта в условиях риска, можно таблицу 3.4.3 дополнить еще одной моделью:  $\sum B(p_i)D(x_i)$ .

Для оценки параметра модальности  $\nu$  (см. выражения (3.4.13) – (3.4.16)) можно использовать выражение [191]:

$$\nu = \frac{\ln R_{\max} - \ln R_{\min}}{\ln S_{\max} - \ln S_{\min}}, \quad (3.4.17)$$

где:  $S_{\max}$  ( $S_{\min}$ ) – максимальное (минимальное) значение интенсивности раздражителя;  $R_{\max}$  ( $R_{\min}$ ) – максимальное (минимальное) значение реакции.

В табл. 3.4.4 показаны сводные данные по годам потерь США во вьетнамской войне (с накоплением); общее число страниц, на которых появляются истории о вьетнамской войне и количество протестов [384].

Таблица 3.4.4. Потери, сообщения и протесты в годы вьетнамской войны

| Год  | Потери ВС США | Средний % поддержки, $\theta$ | Провоенных сообщений* $s_{yi}$ | Антивоенных сообщений* $s_{xi}$ | Отношение, $s_i = s_{yi} / s_{xi}$ | Количество протестующих, $q_i$ |
|------|---------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| 1965 | 1 000         | 62,50                         | 50                             | 18                              | 50/18                              | 50 000                         |
| 1966 | 6 000         | 51,75                         | 80                             | 20                              | 80/20                              | 100 000                        |
| 1967 | 16 000        | 48,00                         | 70                             | 27                              | 70/27                              | 400 000                        |
| 1968 | 30 000        | 39,00                         | 65                             | 38                              | 65/38                              | 625 000                        |
| 1969 | 40 000        | 35,50                         | 40                             | 40                              | 40/40                              | 850 000                        |
| 1970 | 44 000        | 33,75                         | 20                             | 45                              | 20/45                              | 925 000                        |
| 1971 | 45 000        | 29,50                         | 15                             | 50                              | 15/50                              | 1 000 000                      |

\* – количество сообщений в журналах «Тайм», «Ньюсуик» и «Лайф»

Итак, неизвестны количества социальных воздействий на среднего гражданина США  $y_i$  и  $x_i$ , направленных на поддержку войны или протест против нее в  $i$ -м году. Но можно предположить, что отношение этих воздействий равно  $s_i$ . Поскольку в годы войны в США действовала всеобщая воинская повинность, то можно считать, что антивоенные социальные воздействия связаны с угрозой своей жизни (быть убитым или раненым) или жизни близких.

Используя выражение (3.4.17), найдем оценку параметра  $\nu$  воздействий антивоенного характера (данные по войне в Корее и во Вьетнаме):

$$\nu_k = \frac{\ln R_{\max} - \ln R_{\min}}{\ln S_{\max} - \ln S_{\min}} = \frac{\ln 15000000 - \ln 100}{\ln(0,10 \cdot 5764143) - \ln 100} = 0,67,$$

$$\nu_b = \frac{\ln R_{\max} - \ln R_{\min}}{\ln S_{\max} - \ln S_{\min}} = \frac{\ln 19000000 - \ln 100}{\ln(0,10 \cdot 8752000) - \ln 100} = 0,66,$$

где:  $R_{\max}$  – максимально возможное количество протестующих против войны (10% численности населения),  $S_{\max}$  – максимально возможные потери, при которых войска еще способны выполнять поставленные задачи (10% от общей численности).

Отметим, что при максимально возможных потерях, равных 5% от численности войск, получим следующие значения параметра модальности:  $\nu = 0,69$ .

Пусть  $\theta_i$  есть степень поддержки войны американским обществом в  $i$ -м году. Положим, что  $\alpha = 0,5$ , коэффициенты размерности  $k_x = k_y = k$ . Тогда значение функции влияния в  $i$ -м году равно:

$$B(\theta_i) = \frac{0,5 \cdot \theta_{i-1} \exp\left(\frac{k(xq_i s_i)^{\nu+1}}{\nu+1}\right)}{1 - \theta_{i-1} + \theta_{i-1} \exp\left(\frac{k(xq_i s_i)^{\nu+1}}{\nu+1}\right)} + \frac{0,5 \cdot \theta_{i-1} \exp\left(\frac{-k(xq_i)^{\nu+1}}{\nu+1}\right)}{1 - \theta_{i-1} + \theta_{i-1} \exp\left(\frac{-k(xq_i)^{\nu+1}}{\nu+1}\right)}. \quad (3.4.18)$$

Значения переменных  $s_i$  и  $q_i$  берутся из табл. 3.4.4. Методом наименьших квадратов получены следующие оценки параметров:  $k = 0,05$ ;  $x = 0,02$ ;  $\nu = 0,04$ . Из расчетов видно, что значение параметра модальности для социальных воздействий, связанных с жизнью и здоровьем людей, близко к 1; для воздействий информационного характера значение параметра близко к 0.

Применим полученные оценки параметров модели влияния для анализа социальных событий в американском обществе, связанных с войной США в Ираке. Примерно с конца 1970-х – начала 1980-х годов в общественном мнении США по отношению к Ираку шло формирование образа врага (в 1980 г. 15% американцев считали Ирак врагом, в 1987 г. – 28%). Ирак – небольшая региональная страна, имеющая слабые вооруженные силы, никогда не плани-

ровал военное вторжение в США, но обладал значительными запасами нефти. Поэтому становится понятной реакция респондентов на вопрос, который задавался институтом Гэллапа: «Как вы думаете, в чем причина вовлеченности США в ситуацию с Ираком, и почему наши войска находятся в Саудовской Аравии?» 49% опрошенных ответили: «Чтобы защитить наши экономические интересы и доступ к нефти», 17% – «что нам следует защищать другие страны», 11% – «чтобы остановить иракскую агрессию», 4% – «чтобы защитить американских граждан» [195]. После аннексии Ираком Кувейта и войны в Персидском заливе значение степени неблагоприятности к Ираку достигло 50–70%. После теракта 11.09.2001 г. степень неблагоприятности составляла 49–57%, в ходе активной военной фазы (март – май 2003 г.) – 63–76%.

После успешного завершения фазы активных действий война в Ираке приняла затяжной характер, и американская общественность стала выступать против войны. Причинами антивоенных выступлений были в основном следующие: 1) война обходится слишком дорого (38.1%), 2) потери ВС США слишком высоки (23.4%), 3) победить в войне невозможно («вьетнамский синдром», 21.8%) и 4) чрезмерные жертвы среди гражданского населения (16.7%). В табл. 3.4.5 показана динамика изменения названных факторов.

Таблица 3.4.5. Факторы, влияющие на изменение общественного мнения

| Год  | Затраты, млрд. \$ | Потери ВС США, чел. | Вьетнамский синдром | Жертвы гражд. нас-я, чел. | Обобщенный фактор, % |
|------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|----------------------|
| 2003 | 58                | 486                 | 0.14                | 10 000                    | 24                   |
| 2004 | 81                | 1335                | 0.26                | 18 000                    | 40                   |
| 2005 | 91                | 2181                | 0.37                | 33 000                    | 54                   |
| 2006 | 105               | 3003                | 0.46                | 53 000                    | 69                   |
| 2007 | 136               | 3905                | 0.53                | 72 000                    | 88                   |
| 2008 | 160               | 4219                | 0.6                 | 80 000                    | 100                  |

В качестве показателя вьетнамского синдрома принята экспонента, причем вероятность поражения в войне к исходу 6-го года принята равной 0,6. Обобщенный безразмерный фактор получен из перечисленных с учетом их важностей (весов). При этом отдельные факторы нормированы (разделены на их максимальное значение). Из таблицы видно, что обобщенный фактор коррелирует с затратами США на оккупацию Ирака.

В табл. 3.4.6 представлены результаты опросов (средние по годам), показывающие уровень поддержки общественным мнением войны в Ираке с окончания активной фазы войны (1 мая 2003 г.). Информационные сообщения включают передачи четырех основных национальных телеканалов и статьи пяти крупнейших национальных газет.

Таблица 3.4.6. Поддержка общественным мнением войны в Ираке и информационные сообщения

| Год  | Опрос 1 | Опрос 2 | Опрос 3 | Опрос 4 | Опрос 5 | Опросы, среднее ( $b_i$ ) | Потребляется сообщений за сутки, час | Доля сообщений в поддержку войны, % |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 2003 | 54,2    | 58,2    | 66,5    | 55,4    | 56,5    | 58                        | 1,9                                  | 72                                  |
| 2004 | 46,5    | 49,5    | 52,0    | 42,2    | 48,9    | 48                        | 1,9                                  | 52                                  |
| 2005 | 40,5    | 43,9    | 47,4    | 45,3    | 43,9    | 44                        | 1,9                                  | 40                                  |
| 2006 | 34,8    | 40,0    | 43,4    | 39,3    | 40,3    | 40                        | 1,9                                  | 34                                  |
| 2007 | 27,5    |         | 37,9    | 35,5    | 36,2    | 36                        | 1,9                                  | 30                                  |
| 2008 | 31,0    |         | 38,9    | 48,3    | 34,7    | 38                        | 1,9                                  | 30                                  |

Опрос 1. «Вы одобряете или не одобряете работу, которую проводит Дж. Буш-младший применительно к ситуации в Ираке?»

Опрос 2. «Как Вы считаете, стоило или не стоило начинать войну в Ираке?»

Опрос 3. «С точки зрения развития событий со времени отправки войск в Ирак, думаете ли Вы, что отправка войск США в Ирак была ошибкой или не была ошибкой?». Ответ – «Нет, не ошибка».

Опрос 4. «В целом Вы как Вы можете оценить состояние дел в Ираке для США?». Ответ – «Хорошо» («Очень» + «Умеренно»).

Опрос 5. «Оценивая затраты США, Вы считаете, что война в Ираке этого стоила или не стоила?»

В годы войны в Ираке Армия США набиралась по контрактному принципу и ее потери были невелики. Ожидания от войны в американском обществе носили преимущественно экономический и политический характер. Поэтому для социальных воздействий примем следующие значения параметров:  $\nu = \nu = 0,04$ ;  $k = 0,05$ . В качестве значений воздействия  $x$  по годам примем затраты на оккупацию Ирака и найдем ожидаемую американским обществом геополитическую прибыль (воздействие  $y$ ). Методом наименьших квадратов получено, что ежегодная ожидаемая прибыль равна  $y = 34$  млрд. \$ (доходы от военного контроля стран Персидского залива). Вероятно, по этой причине США многие годы осуществляют незаконную оккупацию Ирака и части Сирии.

В правоохранительной сфере широко применяется для расчета полезности  $u_1$  незаконной деятельности преступника (экономического агента) модель Г. Беккера [42]:

$$u_1 = (1 - p_z)u(s) + p_z u(s - r), \quad (3.4.19)$$

где:  $p_z$  – вероятность задержания и наказания преступника;  $s$  – прибыль от незаконной деятельности;  $r$  – денежная величина потерь в случае наказания;  $u(\cdot)$  – функция полезности.

Интересно отметить, что С. Камерон, сторонник теории ограниченной рациональности, фактически критикует Г. Беккера за неиспользование им

представлений о вероятности: рациональный преступник учитывает не реальные данные о раскрываемости, а лишь доступную ему информацию. Если повышение раскрываемости остается преступниками незамеченным, то его сдерживающий эффект оказывается нулевым. В таком случае работа средств массовой информации может сама по себе, безотносительно к реальным успехам деятельности полиции, снизить преступность (если тиражируется информация об успехах в борьбе с преступностью) или повысить ее (если СМИ громкогласно объявляют о беспомощности полиции) [433].

В условиях социально-информационных воздействий на потенциального преступника полезность  $u_1$  его незаконной деятельности равна:

$$u_1 = [1 - B(p_z)]D(s) + B(p_z)[D(s) - D(r)] = D(s) - B(p_z)D(r), \quad (3.4.20)$$

где:  $B(\cdot)$  есть функция представления (восприятия) о субъективной или объективной вероятности,  $D(\cdot)$  – функция представления (восприятия) о показателе интервального типа.

Неэкономические субъекты (террористы и др.) выбирают альтернативу, сравнивая полезности  $u_0 = 1 - p_0$  и  $u_1 = 1 - p_1$ , где  $p_0$  есть пороговая вероятность (вероятность нейтрализации, при которой субъекты массово отказываются от незаконной деятельности),  $p_1$  – вероятность их задержания (нейтрализации).

В условиях внешних информационных воздействий неэкономические субъекты выбирают альтернативы, сравнивая представления  $B(p_0)$  и  $B(p_1)$ . На картине В. Верещагина «Дьявольский ветер» изображена казнь англичанами лидеров восстания сипаев путем привязывания приговоренных к жерлу пушки и последующем выстреле из нее сквозь тело жертвы. Особый ужас данного типа казни для приговоренных заключался в том, что «Дьявольский ветер» разрывал тело жертвы на куски: «Смерти этой они не боятся, и казнь их не страшит; но чего они избегают, чего боятся, так это необходимости предстать пред высшим судьей в неполном, истерзанном виде, без головы, без рук, с недостатком членов...» [82, с. 153]. Информация о казни подобным способом снижает представление о пороговой вероятности и служит скорейшему усмирению восставших.

Противник может стремиться ввести нас в заблуждение, подавая сообщения о преувеличенной или приуменьшенной численности своих войск на некотором участке фронта. Эффективность некоторых мероприятий по маскировке может быть оценена с использованием функции социально-информационного влияния.

В целом, задачам социального влияния и управления посвящено множество работ. Заинтересованный читатель может ознакомиться с обзорами,

приведенными в «Управление толпой: математические модели порогового коллективного поведения» [63], «Рефлексия и управление: математические модели» [260], «Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства» [122].

Таким образом, рассмотрены базовые функции: функция победы в бою (сражении, операции), агрегированные функции в задачах охраны границы и функция социально-информационного влияния. Первые две функции далее используются в качестве целевых функций в задачах моделирования боевых и специальных действий, и в задачах защиты и охраны границы. Функция социально-информационного влияния может использоваться при моделировании информационных и когнитивных (ментальных) войн, в задачах маскировки и дезинформации противника.

## **ГЛАВА 4. МОДЕЛИ ОБЩЕВОЙСКОВЫХ ДЕЙСТВИЙ**

Настоящая глава состоит из четырех разделов. В первом разделе рассмотрены классические теоретико-вероятностные модели боевых действий. Во втором – модели динамики боевых действий типа Осипова-Ланчестера (как исторически первые модели динамики боевых действий, не потерявшие своей актуальности и сегодня), их расширения и результаты проверки моделей на примере операции коалиционных сил в Ираке «Буря в пустыне». Третий раздел посвящен описанию теоретико-игровых (базовых) моделей боя, предназначенных для обоснования замысла командира в части определения направления главного удара (сосредоточения основных усилий) и боевого порядка (распределения частей и подразделений по задачам). В последнем разделе дано описание двух имитационных моделей боя.

### **4.1. Теоретико-вероятностные модели боевых действий**

В хрестоматийной работе по методам исследования операций Ф. М. Морза и Дж. Е. Кимбелла [239] отмечается, что теория вероятностей является той отраслью математики, применение которой наиболее полезно при исследовании операций.

Базовыми в математическом моделировании боевого взаимодействия являются два вопроса:

- 1) Какова вероятность того, что до определенного момента времени данный объект (цель) не будет поражен?
- 2) Каково число объектов, которые до определенного момента времени еще не поражены?

Примечание. Вместо временного ограничения могут использоваться ресурсные (расход выстрелов) или технологические (предельный режим огня) ограничения.

Ответы на эти вопросы при заданных вероятностях поражений (быть может, зависящих от времени и/или числа попыток или попаданий) получают для различных условий взаимодействия сторон (перечисляемых в порядке возрастания сложности):

- 1) по одному объекту ведет огонь одна боевая единица;
- 2) по одному объекту ведут огонь несколько одинаковых боевых единиц;
- 3) по нескольким одинаковым объектам ведут огонь несколько одинаковых боевых единиц;
- 4) по нескольким разнородным объектам ведут огонь несколько разнородных боевых единиц;
- 5-8) в ситуациях 1-4 объекты имеют возможность вести ответный огонь (модели дуэлей).

Названные условия могут быть расширены, если учитывать подвижность (стационарность) целей и средств поражения, наблюдаемость (не наблюдаемость) результатов стрельбы, степень поражения целей (уничтожение, разрушение, подавление, изнурение, ограничение свободы маневра и др.), вид огня (сосредоточенный огонь, подвижный или неподвижный заградительный огонь, огневой вал и др.), противодействие со стороны других объектов противника (артиллерия ведет огонь по пехоте противника, противник ведет контрбатареиную стрельбу и др.), наличие ложных целей и т. д.

Иногда (крайне редко) добавляется возможность восстановления пораженных объектов и/или боевых единиц противника.

То есть, основаниями классификации ситуаций могут быть:

- число поражаемых объектов (целей) и их характер;
- число средств поражения;
- однократность/многократность попыток поражения;
- возможность объекта противника вести ответный огонь<sup>1</sup>.

Здесь и далее не рассматриваются вопросы теории стрельбы; в частности, полагаются известными вероятности попадания (и другие характеристики, включая рассеивание) в конкретную цель из конкретного средства поражения в заданных условиях.

Характеристики поражаемых объектов и средств поражения учитываются с помощью так называемых *законов*, связанных с поражением целей.

В качестве *закона рассеивания* при стрельбе (бомбометании) применяется, как правило, нормальный закон (закон Гаусса) с плотностью  $f(x, y)$  на плоскости (при условии хотя бы приближенного совпадения координатных осей с главными осями рассеивания):

---

<sup>1</sup> Основная сложность моделирования боевых действий (и огневого поражения, в частности) заключается в необходимости учета воздействий противника.

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-a_x)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-a_y)^2}{\sigma_y^2}\right)\right), \quad (4.1.1)$$

где:  $a_x, a_y$  – координаты центра рассеивания (если они не совпадают с целью, то имеется систематическая ошибка при стрельбе),  $\sigma_x, \sigma_y$  – средние квадратические отклонения по осям  $Ox, Oy$  (характеризуют случайные ошибки).

В расчетах обычно используют не среднеквадратические, а вероятные (или «срединные») отклонения [81, с. 127-130]:

$$E_x = \rho\sqrt{2}\sigma_x, \quad E_y = \rho\sqrt{2}\sigma_y, \quad \rho \approx 0,477. \quad (4.1.2)$$

Параметры  $a_x, a_y, E_x, E_y$  называются *характеристиками рассеивания*.

Перечислим некоторые *виды законов поражения*:

1) Координатный закон поражения (зависимость вероятности поражения цели от координат точек попаданий выстрелов).

2) Зависимость вероятности поражения цели  $G(m)$  от количества попавших в нее выстрелов  $m$  (просто «закон поражения цели»). Для независимых выстрелов этот закон имеет две формы (см. [170; 78] и раздел 3.2.1):

*показательный закон поражения*

$$G(m) = 1 - (1 - p)^m, \quad \omega = 1/p, \quad (4.1.3)$$

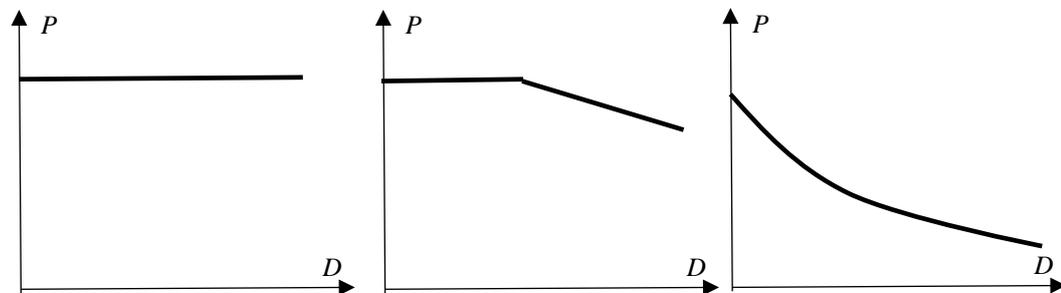
где  $p$  – вероятность поражения цели при одном попадании,  $\omega$  – среднее необходимое число попаданий для поражения цели;

*экспоненциальный закон поражения* (или закон поражения А. Н. Колмогорова)

$$G(m) = 1 - e^{-\alpha m}, \quad \alpha = -\ln(1 - 1/\omega), \quad (4.1.4)$$

где  $\alpha$  – параметр.

3) Зависимость вероятности поражения цели от дальности до нее (см. [180] и рис. 4.1.1). Форма зависимости различна для высокоточного оружия (константа), стрельбы с закрытых огневых позиций (полуконстанта) и стрельбы прямой наводкой (экспонента).



(1) константа,

(2) полуконстанта,

(3) экспонента

Рис. 4.1.1. Типовые зависимости вероятности поражения целей от дальности до них

Время поражения цели (и расход выстрелов) зависит от множества факторов и, в первую очередь, от требуемой (назначенной) степени ее поражения.

В зависимости от величины ущерба, нанесенного составным объектам, достигаются различные степени поражения. Обычно для качественно различных степеней поражения объектов устанавливаются следующие значения ущербов<sup>1</sup>:

до 0,2 – слабое поражение;

0,2 - 0,3 – подавление;

0,5 - 0,6 (0,6 - 0,9) – сильное поражение целей, не содержащих (содержащих) средства ядерного нападения;

более 0,7 (0,9) – уничтожение целей, не содержащих (содержащих) средства ядерного нападения.

По решению командира с учетом обстановки могут назначаться и другие степени поражения.

#### ***4.1.1. Показатели эффективности стрельбы по одиночным, групповым и площадным целям***

*Показателем эффективности стрельбы по одиночным целям* является вероятность ее поражения с требуемой точностью. Способ расчета указанной вероятности зависит от вида (типа) оружия и выстрела, характеристик цели и рассмотрен в литературе (см. [78] и др.). Результаты расчетов (обычно в форме требуемого количества выстрелов) отражаются в таблицах стрельбы.

В ряде случаев вероятность поражения цели при  $n$  выстрелах может быть вычислена по формуле Колмогорова (формуле полной вероятности):

$$W = \sum_{m=1}^n P_{m,n} G(m), \quad (4.1.5)$$

где:  $P_{m,n}$  – вероятность попадания в цель ровно  $m$  раз;  $G(m)$  – вероятность поражения цели при попадании в нее  $m$  выстрелов. Если выстрелы независимы и вероятность  $p$  попадания в цель при всех выстрелах одна и та же, то вероятность  $P_{m,n}$  вычисляется по формуле Бернулли:

$$P_{m,n} = C_n^m p^m (1-p)^{n-m}, \quad C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}, \quad (4.1.6)$$

где  $C_n^m$  – число сочетаний из  $n$  по  $m$ .

---

<sup>1</sup> Поражение объекта (цели). – URL: <https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=14640> (дата обращения: 10.08.2024).

*Групповой целью* называется совокупность нескольких однородных одиночных целей (группа пехоты или танков и т. д.). При стрельбе по групповой цели в качестве показателя эффективности принимается *математическое ожидание*  $M_g$  числа пораженных одиночных целей (стрельба без переноса огня):

$$M_g = \sum_{i=1}^N W_i, \quad (4.1.7)$$

где  $W_i$  – вероятность поражения  $i$ -й цели,  $N$  – количество одиночных целей в группе.

Другими показателями при стрельбе по групповой цели могут быть: вероятность поражения всех  $N$  единиц; вероятность поражения не менее  $k$  единиц.

Сделаем допущение, что расстояние между целями таково, что одним выстрелом может быть поражена только одна цель. Это допущение является естественным, поскольку противник, зная возможности нашего основного оружия, будет стремиться к рассредоточению своих сил и средств.

Рассмотрим два случая: 1) стрельба без переноса огня (результат стрельбы не наблюдаем или за требуемое время перенос огня невозможен); 2) стрельба с переносом огня).

Если цели однородны, то при стрельбе *без переноса огня* вероятность того, что будет поражено ровно  $k$  единиц вычисляется по формуле Бернулли:

$$P_{N,k} = C_N^k W^k (1-W)^{N-k}. \quad (4.1.8)$$

Тогда вероятность поражения всех  $N$  единиц равна:

$$P_{N,N} = W^N. \quad (4.1.9)$$

(искомую вероятность вычисляем через противоположное событие – вероятность не поражения всех единиц).

Соответственно, вероятность поражения хотя бы  $k$  единиц равна:

$$P_{\geq k} = P_{N,k} + P_{N,k+1} + \dots + P_{N,N}. \quad (4.1.10)$$

Вероятность поражения хотя бы одной единицы можно вычислить через противоположное событие:

$$P_{\geq 1} = 1 - P_{N,0} = 1 - (1-W)^N. \quad (4.1.11)$$

При стрельбе по групповой цели *с переносом огня* математическое ожидание числа пораженных целей равно [78]:

$$M_g = np, \text{ при } n < N, \quad (4.1.12)$$

где  $n$  – количество выстрелов;  $p$  – вероятность поражения цели одним выстрелом.

Расчеты показателей эффективности стрельбы по *компактной цели* (одним выстрелом может быть поражено несколько целей) можно найти в работе [78].

Цель называется *площадной*, если объекты для поражения расположены в некоторой области (на площади), причем точно не известны ни их координаты, ни точное количество объектов. Например, ротный опорный пункт, командный пункт бригады, личный состав и техника в районе сосредоточения и т. д. Зачастую очертания фигуры, ограничивающей площадную цель, неопределенны; из тактических соображений и характера местности можно лишь указать примерные размеры цели по фронту и в глубину.

По А. Н. Колмогорову при стрельбе по площадной цели достаточно знать математическое ожидание  $M(\xi)$  производимого ею ущерба  $\xi$ . Обозначим через  $M(\xi | m)$  условное математическое ожидание ущерба  $\xi$  в предположении, что в результате стрельбы получилось ровно  $m$  попаданий. Тогда получим [170]:

$$M(\xi) = \sum_{i=1}^n P_i M(\xi | i), \quad (4.1.13)$$

где  $P_i$  – вероятность ровно  $i$  попаданий по цели. Если допустить, что математическое ожидание наносимого ущерба  $M(\xi | m)$  пропорционально числу попаданий  $m$ , т. е. что

$$M(\xi | m) = cm, \quad (4.1.14)$$

где  $c$  – постоянный множитель, то формула (4.1.13) приводится к виду [170]

$$M(\xi) = cM(\mu), \quad (4.1.15)$$

где  $M(\mu)$  – математическое ожидание числа попаданий по цели.

Для типовых площадных целей и средств поражения математическое ожидание  $M(\xi)$  заранее рассчитывается и проверяется в полигонных условиях (см. табл. 3.2.1).

Рассмотрим *пример 1*. Пусть математическое ожидание степени ущерба, наносимого площадной цели, вычисляется по формуле

$$M(k) = 1 - e^{-\beta k}, \quad (4.1.16)$$

где  $\beta$  – параметр,  $k$  – число выстрелов по цели. Степень поражения цели 0,5 достигается при 100 выстрелах. Найти требуемое количество выстрелов для достижения степени поражения 0,6.

Решение. При  $M(k) = 0,5$  и  $k = 100$  из (4.1.16) имеем  $\beta = \frac{-\ln 0,5}{100} \approx 0,007$ .

Тогда для достижения степени поражения 0,6 потребуется

$$k = \frac{-\ln(1 - 0,6)}{\beta} \approx 133 \text{ выстрела.}$$

При стрельбе по площадным целям для повышения эффективности их поражения в ряде случаев требуется введение так называемого искусственного рассеивания снарядов. Эта задача А. Н. Колмогоровым была поставлена и решена в [170; 171]. Другие особенности поражения целей, включая учет возможностей разведки, рассмотрены в хрестоматийной работе Ю. В. Чуева [371].

Далее рассмотрим задачи поражения целей в условиях противодействия противника.

#### ***4.1.2. Описание боевых действий с помощью цепей Маркова***

*Марковским*<sup>1</sup> процессом называется случайный процесс, обладающий марковским свойством (называемом также отсутствием последствия или памяти) – условное распределение вероятностей будущих состояний процесса зависит только от нынешнего состояния, а не от последовательности событий, которые предшествовали этому.

Случайный процесс называется *процессом с дискретным временем*, если переходы из одного состояния в другое возможны только в строго определенные, заранее фиксированные моменты времени  $t_1, t_2, \dots$ . В промежутках между ними состояния сохраняются. Случайный процесс называется *процессом с непрерывным временем*, если переходы из одного состояния в другое возможны в любые, наперед не известные случайные моменты времени.

*Цепью Маркова* называется последовательность случайных событий с конечным или счетным числом исходов (состояний), где вероятность наступления каждого события зависит только от состояния, достигнутого в предыдущем событии, а время дискретно.

Рассмотрим *пример 2* [79]. По некоторой цели ведется стрельба четырьмя выстрелами в моменты времени  $t_1, t_2, t_3, t_4$ . Возможные состояния цели (системы  $S$ ):

$S_1$  – цель невредима;

$S_2$  – цель незначительно повреждена;

$S_3$  – цель получила существенные повреждения;

$S_4$  – цель полностью поражена.

---

<sup>1</sup> Российский математик Андрей Андреевич Марков (1856-1922) положил начало изучению последовательностей зависимых испытаний и связанных с ними сумм случайных величин [221]. Основы общей теории марковских процессов с непрерывным временем были заложены Андреем Николаевичем Колмогоровым [169]. К настоящему времени теория марковских процессов превратилась в большой раздел теории вероятностей с огромным числом применений в физике, военном и инженерном деле, в биологических и социальных науках.

Размеченный граф с вероятностями переходов между состояниями показан на рис. 4.1.2.

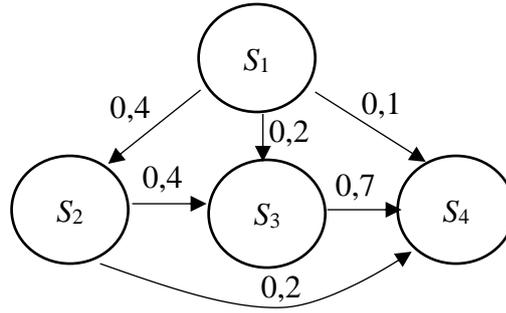


Рис. 4.1.2. Граф состояний системы и вероятности переходов

Матрица переходных вероятностей имеет вид:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0,3 & 0,4 & 0,2 & 0,1 \\ 0 & 0,4 & 0,4 & 0,2 \\ 0 & 0 & 0,3 & 0,7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Элемент матрицы  $p_{ij}$  – вероятность перехода системы  $S$  из состояния  $S_i$  в состояние  $S_j$ ,  $i, j = 1, \dots, n$ , где  $n$  – число состояний системы  $S$ . Отметим, что сумма элементов в каждой строке матрицы равна 1 (с учетом данного свойства определена вероятность  $p_{11} = 0,3$ ).

Вероятности состояний системы на  $k$ -м шаге вычисляются по рекуррентной формуле:

$$P_i(k) = \sum_{j=1}^n P_j(k-1)p_{ji}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (4.1.17)$$

Так как в начальный момент времени система находилась в состоянии  $S_1$ , то  $P_1(0) = 1$ . Вероятности состояний после первого шага (выстрела) берутся из матрицы  $\mathbf{P}$ :

$$P_1(1) = 0,3; P_2(1) = 0,4; P_3(1) = 0,2; P_4(1) = 0,1.$$

После второго шага по формуле (4.1.17) получим:

$$P_1(2) = P_1(1)p_{11} = 0,09;$$

$$P_2(2) = P_1(1)p_{12} + P_2(1)p_{22} = 0,28;$$

$$P_3(2) = P_1(1)p_{13} + P_2(1)p_{23} + P_3(1)p_{33} = 0,28;$$

$$P_4(2) = P_1(1)p_{14} + P_2(1)p_{24} + P_3(1)p_{34} + P_4(1)p_{44} = 0,35.$$

После третьего и четвертого шагов находим:

$$P_1(3) = 0,027; P_2(3) = 0,148; P_3(3) = 0,214; P_4(3) = 0,611;$$

$$P_1(4) = 0,0081; P_2(4) = 0,07; P_3(4) = 0,1288; P_4(4) = 0,7931.$$

Таким образом, после четвертого выстрела с вероятностью 0,7931 цель будет полностью поражена.

Марковская цепь называется *однородной*, если на каждом шаге времени матрица переходных вероятностей  $\mathbf{P}$  одна и та же, от шага к шагу не меняется. Однородные марковские цепи могут использоваться для описания ситуаций, когда боевые возможности сторон со временем не меняются (например, боевые единицы неподвижны). Иначе используются *неоднородные марковские цепи*, в которых на каждом шаге матрицы переходных вероятностей могут меняться.

Если в марковском процессе состояния дискретны, а время непрерывно, то имеем дело с *непрерывной цепью Маркова*.

*Пример 3* [79]. Пусть имеется непрерывная цепь Маркова (рис. 4.1.3) с плотностями вероятностей перехода

$$\lambda_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{ij}(\Delta t)}{\Delta t}, \quad i \neq j, \quad (4.1.18)$$

где  $p_{ij}(\Delta t)$  – вероятность того, что система, находившаяся в момент времени  $t$  в состоянии  $S_i$ , за время  $\Delta t$  перейдет из него в состояние  $S_j$ . Заметим, если указанные плотности не зависят от времени  $t$  (т. е. от того, в какой момент начинается элементарный участок  $\Delta t$ ), то непрерывная цепь Маркова называется *однородной*, иначе – *неоднородной*.

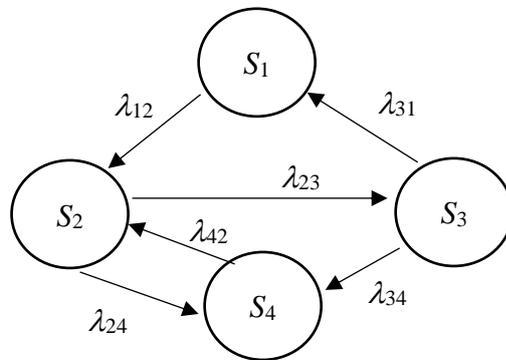


Рис. 4.1.3. Граф состояний системы и плотности вероятностей переходов

Вероятности состояний системы как функции времени описываются уравнениями Колмогорова:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = -\left(\sum_{j=1}^n \lambda_{ij}\right)P_i(t) + \sum_{j=1}^n \lambda_{ji}P_j(t), \quad i = 1, \dots, n, \quad t \geq 0. \quad (4.1.19)$$

Для рассматриваемого примера получим (для краткости аргумент  $t$  опущен):

$$\begin{aligned}\frac{dP_1}{dt} &= -\lambda_{12}P_1 + \lambda_{31}P_3, \\ \frac{dP_2}{dt} &= -\lambda_{23}P_2 - \lambda_{24}P_2 + \lambda_{12}P_1 + \lambda_{42}P_4, \\ \frac{dP_3}{dt} &= -\lambda_{31}P_3 - \lambda_{34}P_3 + \lambda_{23}P_2, \\ \frac{dP_4}{dt} &= -\lambda_{42}P_4 + \lambda_{24}P_2 + \lambda_{34}P_3.\end{aligned}$$

Интегрирование этой системы уравнений даст искомые вероятности состояний как функции времени. Начальные условия берутся в зависимости от того, в каком состоянии находилась система в момент  $t = 0$ . Например, если система находилась в состоянии  $S_1$ , то  $P_1(0) = 1$ ,  $P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = 0$ .

*Потоком событий* в марковских процессах называется последовательность однородных событий, следующих одно за другим в какие-то случайные моменты времени. Особую роль играет *простейший (пуассоновский) поток событий*, обладающий свойствами стационарности, отсутствия последействия и ординарности (см. [79]). *Интенсивностью потока*  $\lambda$  называют среднее число событий, которые появляются в единицу времени.

Для простейшего потока вероятность появления ровно  $m$  событий за время  $\tau$  определяется формулой Пуассона:

$$p_m(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^m}{m!} e^{-\lambda\tau}, \quad (4.1.20)$$

где величина  $a = \lambda\tau$  – среднее число событий на интервале  $\tau$ .

Если выполняются два условия: а) поток событий простейший, б) число состояний системы  $S$  конечно и из каждого состояния системы можно перейти (за то или иное число шагов) в каждое другое, то предельные вероятности состояний (при  $t \rightarrow \infty$ ) существуют и не зависят от начального состояния системы. Для нахождения предельных вероятностей следует левые части уравнений Колмогорова приравнять нулю и использовать нормировочное условие:

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1.$$

Одно из множества применений марковских процессов – это моделирование *стохастических дуэлей* [84, 369, 371]. Рассмотрим дуэль двух боевых единиц. Первая единица способна поражать вторую с вероятностью  $p_1(t)$ , а вторая первую – с вероятностью  $p_2(t)$ . Скорострельности (число выстрелов в единицу времени) единиц соответственно равны  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

Вероятности выживания в дуэли первой  $P_A(t)$  и второй  $P_B(t)$  единицы равны [371]:

$$\begin{aligned} P_A(t) &= 1 - \int_0^t \lambda_2 p_2(\tau) \exp\left(-\int_0^\tau [\lambda_1 p_1(u) + \lambda_2 p_2(u)] du\right) d\tau, \\ P_B(t) &= 1 - \int_0^t \lambda_1 p_1(\tau) \exp\left(-\int_0^\tau [\lambda_1 p_1(u) + \lambda_2 p_2(u)] du\right) d\tau. \end{aligned} \quad (4.1.21)$$

Если вероятности  $p_1(t)$  и  $p_2(t)$  не меняются во времени (например, единицы не перемещаются), то выражения упрощаются:

$$\begin{aligned} P_A(t) &= 1 - \frac{\lambda_2 p_2}{\lambda_1 p_1 + \lambda_2 p_2} (1 - \exp[-(\lambda_1 p_1 + \lambda_2 p_2)t]), \\ P_B(t) &= 1 - \frac{\lambda_1 p_1}{\lambda_1 p_1 + \lambda_2 p_2} (1 - \exp[-(\lambda_1 p_1 + \lambda_2 p_2)t]). \end{aligned} \quad (4.1.22)$$

Из последнего выражения видно, что исход боя определяется произведениями  $\lambda_1 p_1$  и  $\lambda_2 p_2$ , т. е. уменьшение вероятности поражения единицы противника можно компенсировать увеличением скорострельности.

*Пример 4* [371]. Два танка ведут огневую дуэль с вероятностями поражения 0,6 и 0,3 соответственно. Их скорострельности равны  $\lambda_1 = 2$  выстр./мин и  $\lambda_2 = 3$  выстр./мин. Определить вероятности выживания через 2 минуты боя.

Решение. По формулам (4.1.22) находим  $P_A(2) = 0,56$ ,  $P_B(2) = 0,44$ .

Стохастические дуэли классифицируются по числу участников, ограничениям на боекомплект, системе огня и маневра и другим основаниям.

Даже при моделировании боя малочисленных подразделений возникают серьезные трудности аналитического и вычислительного порядка (резкий рост числа состояний системы, сочетание дискретных и непрерывных состояний, разный характер потоков и т. д.).

В целях устранения указанных трудностей при моделировании крупных группировок войск используется так называемый метод динамики средних.

### 4.1.3. Метод динамики средних

Математический аппарат марковских случайных процессов в ряде случаев (аналитически или численно) позволяет найти вероятности всех состояний системы. Даже если получены тысячи и десятки тысяч вероятностей состояний, результаты будут трудно обозримыми. Чтобы их осмыслить, придется вводить какие-то обобщенные характеристики процесса.

*Метод динамики средних* предназначен для непосредственного изучения средних характеристик случайных процессов, протекающих в сложных системах с большим (практически необозримым) числом состояний. При этом основной применимости метода динамики средних является именно то, что препятствует изучению явлений более подробными методами: сложность изучаемых процессов и большое число участвующих в них элементов [79].

Для демонстрации возможностей метода динамики средних рассмотрим модель боя двух группировок, состоящих из большого числа однородных боевых единиц. Положим, что каждая единица производит пуассоновский поток выстрелов с некоторой интенсивностью  $\lambda$  (как константой, так и переменной, зависящей от времени). Эта интенсивность (средняя боевая скорострельность) зависит как от характеристик оружия, так и от возможностей средств разведки и организационных мер по ведению огня.

Если стрельба ведется по однородным целям, то удобно вместо скорострельности  $\lambda$  пользоваться *эффективной скорострельностью*  $\lambda^* = \lambda p$ , где  $p$  – вероятность поражения цели одним выстрелом.

Простейшая модель боя показана на рис. 4.1.4 [79].

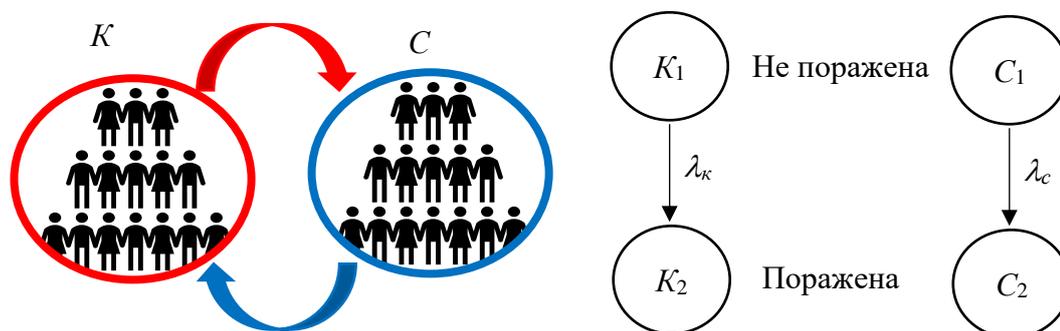


Рис. 4.1.4. Схема боя и граф состояний

Относительно организации боя примем следующие предположения.

1. Каждая из сторон (первая сторона – красные, вторая – синие) имеют однородные боевые единицы;  $x(0) = x_0$  – число единиц первой стороны,  $y(0) = y_0$  – число единиц второй в начальный момент боя.

2. Каждая единица первой стороны может вести огонь по любой единице второй стороны и наоборот.

3. Огонь прицельный, и одним выстрелом можно поразить только одну единицу противника.

4. Обстрелу подвергается с одинаковой вероятностью любая из еще не пораженных единиц противника; после ее поражения стрельба переносится на

другие непораженные единицы. Пораженная единица прекращает стрельбу и в боевых действиях не участвует.

Уравнения Колмогорова для вероятностей состояний двух боевых единиц таковы (единицы не поражены, состояния  $K_1$  и  $C_1$ ):

$$\begin{aligned}\frac{dP_1}{dt} &= -\lambda_k P_1, \\ \frac{dP_2}{dt} &= -\lambda_c P_2,\end{aligned}$$

где  $\lambda_k$  и  $\lambda_c$  – интенсивности поражения (вывода из боя) единиц первой и второй стороны. Умножим левую и правую части уравнений на число боевых единиц сторон:

$$\begin{aligned}\frac{d(P_1 x_0)}{dt} &= -\lambda_k P_1 x_0, \\ \frac{d(P_2 y_0)}{dt} &= -\lambda_c P_2 y_0.\end{aligned}$$

Заметим, что выражения  $P_1 x_0$  и  $P_2 y_0$  есть численности сторон в момент времени  $t$ , т. е.

$$\begin{aligned}\frac{dx(t)}{dt} &= -\lambda_k x(t), \\ \frac{dy(t)}{dt} &= -\lambda_c y(t).\end{aligned}$$

Найдем интенсивности  $\lambda_k$  и  $\lambda_c$ . Пусть  $a_x$  и  $a_y$  есть эффективные скорострельности первой и второй стороны соответственно. В момент  $t$  каждая из сторон делают  $a_x x(t)$  и  $a_y y(t)$  успешных выстрелов. Эти выстрелы равномерно распределяются между всеми непораженными единицами противника, так что на каждую из них приходится в среднем  $a_x x(t) / y(t)$  и  $a_y y(t) / x(t)$  успешных выстрелов. Тогда получим:

$$\begin{aligned}\frac{dx(t)}{dt} &= -a_y y(t), \\ \frac{dy(t)}{dt} &= -a_x x(t).\end{aligned}$$

Таким образом, получена известная модель динамики боя Осипова-Ланчестера. Используя цепи Маркова и метод динамики средних, можно получать реалистичные модели динамики боя, учитывающие разнородность боевых единиц, их маневр на поле боя, возможности разведки и т. д.

## 4.2. Модели динамики боевых действий типа Осипова-Ланчестера

Исторически первой работой в области моделирования динамики боевых действий явилась статья М.П. Осипова «Влияние численности сражающихся сторон на их потери», опубликованная в 1915 г. Ныне эта классическая модель известна как модель Осипова-Ланчестера и она включена в учебники, пособия и монографии по математике и исследованию операций [26; 79; 575].

### 4.2.1. Модель боевых действий Осипова-Ланчестера

На основе анализа результатов 38 сражений регулярных войск XIX и XX веков (табл. 4.2.1) Михаил Петрович Осипов предложил модель динамики боя и оценил параметры этой модели [274].

Таблица 4.2.1. Характеристики сражений (фрагмент таблицы)

| №  | Сражение            | Сильнейшая численно сторона |       |          | Слабейшая численно сторона |          |       |          |          |
|----|---------------------|-----------------------------|-------|----------|----------------------------|----------|-------|----------|----------|
|    |                     | Название                    | $x_0$ | $x_{ур}$ | $x_{пл}$                   | Название | $y_0$ | $y_{ур}$ | $y_{пл}$ |
| 1  | Аустерлиц, 1805     | Союзники                    | 83    | 27       | –                          | Французы | 75    | 12       | –        |
| 4  | Прейсиш Эйлау, 1807 | Французы                    | 80    | 25       | –                          | Русские  | 64    | 26       | –        |
| 8  | Бородино, 1812      | Французы                    | 130   | 35       | –                          | Русские  | 103   | 40       | –        |
| 9  | Березина, 1812      | Русские                     | 75    | 6        | –                          | Французы | 45    | 15       | 20       |
| 33 | Седан, 1870         | Германцы                    | 245   | 9        | –                          | Французы | 124   | 17       | 107      |
| 36 | Ляоян, 1904         | Русские                     | 150   | 18       | –                          | Японцы   | 120   | 24       | –        |
| 38 | Мукден, 1905        | Русские                     | 330   | 59       | 31                         | Японцы   | 280   | 70       |          |

Примечание.  $x_0$  и  $y_0$  – численности сражавшихся сторон, тыс. чел.;  $x_{ур}$  и  $y_{ур}$  – потери убитыми и ранеными, тыс. чел.;  $x_{пл}$  и  $y_{пл}$  – численности плененных, тыс. чел.

Пусть имеются две стороны, участвующие в боевых действиях. Обозначим через  $x(t)$  ( $y(t)$ ) численность войск первой (второй) стороны в момент времени  $t > 0$ , численности в нулевой момент времени –  $x_0$  и  $y_0$  соответственно. Исключив из рассмотрения операционные потери и ввод (вывод) резервов, получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx(t)}{dt} = -a_y y(t), \quad \frac{dy(t)}{dt} = -a_x x(t), \quad (4.2.1)$$

где  $a_x > 0$  и  $a_y > 0$  – параметры поражающей скорострельности (мощи) боевых единиц первой и второй стороны (эти параметры могут оцениваться исходя из вероятностей поражения целей).

Разделив первое уравнение системы на второе и вычислив интегралы, получим решение в неявном виде – квадратичную модель динамики численности войск<sup>1</sup>:

$$a_y(y^2(t) - y_0^2) = a_x(x^2(t) - x_0^2). \quad (4.2.2)$$

Траекториями (4.2.2) в координатах  $(x, y)$  будут гиперболы (прямая при  $a_y y_0^2 = a_x x_0^2$ ), см. рис. 4.2.1. Условие «равенства сил» имеет вид

$$y_0 = x_0 \sqrt{\frac{a_x}{a_y}} \quad (4.2.3)$$

(для борьбы с вдвое многочисленным противником нужно в четыре раза более мощное оружие, при трехкратном численном превосходстве – в девять раз более мощное и т. д.).

Явным и неявным решениями системы (4.2.1) можно пользоваться только в начальные периоды боя (сражения). По М.П. Осипову победа зависит не от продолжительности боя, а от понесенных сторонами потерь (моральный фактор) – бой продолжается до тех пор, пока потери одной из сторон не достигнут в среднем 20%. По опыту операций Великой Отечественной войны установлено, что потери первого эшелона наступающей дивизии не должны превышать 30%, а обороняющиеся дивизии сохраняют боеспособность при потерях до 60% от первоначальной численности – см. [359] и раздел 4.2.2.

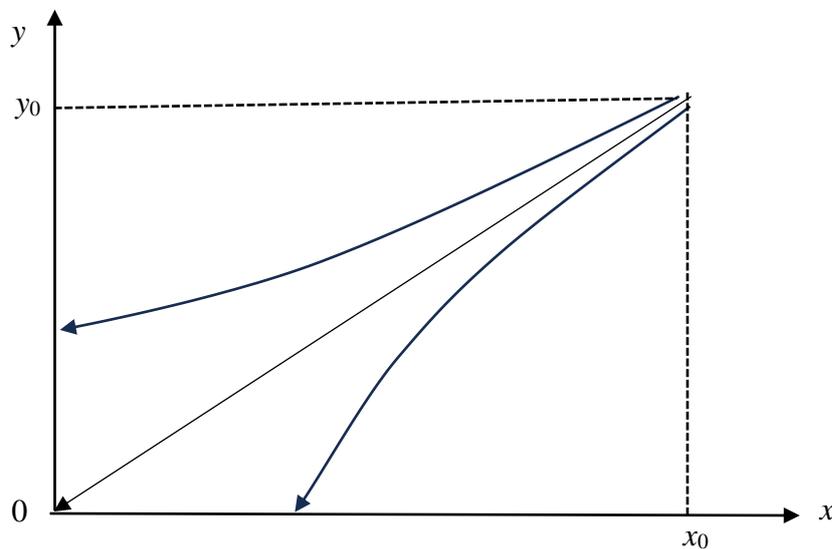


Рис. 4.2.1. Квадратичная модель динамики боя

<sup>1</sup> Система (4.2.1) имеет и явное решение, см. [79].

Рассмотрим расширения модели (4.2.1). *Обычное сражение* описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx(t)}{dt} = -a_y y(t) - b_x x(t) + u(t), \quad \frac{dy(t)}{dt} = -a_x x(t) - b_y y(t) + v(t), \quad (4.2.4)$$

где:  $b_x > 0$  и  $b_y > 0$  – интенсивности операционных потерь (пропорциональны численностям своих войск,  $u(t)$  и  $v(t)$  – ввод резервов в сражение (вывод войск в резерв).

Известны «степенные» уравнения Осипова-Ланчестера:

$$\frac{dx(t)}{dt} = -a_y y^p(t) x^q(t), \quad \frac{dy(t)}{dt} = -a_x x^p(t) y^q(t), \quad (4.2.5)$$

где  $p \geq 0$  и  $q \geq 0$  – показатели степени.

Если  $p = q = 1$  (в общем случае  $p - q = 0$ ), то (4.2.5) – линейная модель боя с условием равенства сил:

$$a_y (y(t) - y_0) = a_x (x(t) - x_0). \quad (4.2.6)$$

Если  $p = 1, q = 0$  (в общем случае  $p - q = 1$ ), то (4.2.5) – квадратичная модель с условием равенства (4.2.2).

Наконец, если  $p = 0, q = 1$  (в общем случае  $q - p = 1$ ), то (4.2.5) – логарифмическая модель боя.

В работе «Hierarchy-of-models approach for aggregated-force attrition» предложено расширение стоящей на вооружении армии США комплексной модели боевых действий, состоящей из трех уровней: 1) дискретно-событийные имитационные модели (метод Монте-Карло) применения отдельных боевых единиц и групп, 2) стохастическая модель на основе марковских процессов и уравнений ланчестеровского типа, 3) детерминированная модель динамики боя [489]. Описание уравнений боя с использованием марковских процессов можно найти, например, в работах [56; 368; 370].

Обзор и описание других расширений модели (4.2.1) можно найти в статьях «Fight the power: Lanchester's laws of combat in human evolution» [487], «Математическая модель экономических последствий вооруженного противостояния неравных по силе противников» [298], «Иерархические модели военных действий» [253], «Обобщенная модель Ланчестера, формализующая конфликт нескольких сторон» [211] и др. Для отражения пространственных эффектов и эффектов от взаимодействия единиц используются уравнения в частных производных [188; 561]. В работе [500] рассмотрены уравнения динамики боя в стохастической форме.

Модель Осипова-Ланчестера не потеряла актуальности и в настоящее время (см. [434; 467; 495; 505]).

Дискретная (по времени) форма модели (4.2.1) имеет вид:

$$x_{n+1} = x_n - a_y \Delta t y_n, \quad y_{n+1} = y_n - a_x \Delta t x_n, \quad (4.2.7)$$

где  $\Delta t > 0$  – интервал дискретизации времени, переменные с индексом  $n$  и  $n+1$  – численности войск сторон на соответствующем шаге дискретизации времени.

К. фон Клаузевиц отмечал, что военное дело просто и вполне доступно здравому уму человека, но воевать сложно. Модель Осипова-Ланчестера отличается выразительностью, убедительностью и простотой. Но для реалистичного планирования и прогнозирования хода и исхода боя (сражения, операции) ее приходится усложнять, учитывать действия разнородных группировок, характеристики оружия, рельеф и местоположение войск, моральный фактор и т. д. и т. п.

Далее рассмотрим некоторые возможные расширения и приложения модели Осипова-Ланчестера, связанные с учетом морального фактора и описанием действий разнородных группировок войск.

#### 4.2.2. Учет морального фактора в модели Осипова-Ланчестера

Одним из первых, кто предложил модифицировать модель Осипова-Ланчестера для учета морального фактора – это Ю.Н. Павловский. В статье «О факторе Л. Н. Толстого в вооруженной борьбе» [280] им предложено считать, что боевые действия продолжаются не до полного уничтожения одной из сторон, а до достижения ими определенного процента потерь, после которого войска теряют боевую способность.

Пусть  $\varphi_x = x(t)/x_0$  – критическая относительная численность войск первой стороны, при которой они теряют боеспособность, а  $\varphi_y = y(t)/y_0$  – соответствующий показатель второй стороны.

Тогда уравнения Осипова-Ланчестера примут вид (индикаторная модель Ю.Н. Павловского [280]):

$$\frac{dx(t)}{dt} = -a_y y(t) I\left(\frac{y(t)}{y_0} > \varphi_y\right), \quad \frac{dy(t)}{dt} = -a_x x(t) I\left(\frac{x(t)}{x_0} > \varphi_x\right), \quad (4.2.8)$$

где  $I(\cdot)$  – функция-индикатор.

В работе «Учет психологических факторов в моделях боя (конфликта)» [388] введены вероятности ведения сторонами боевых действий, несмотря на понесенные потери:

$$P_x(t) = 1 - \left(\frac{x_0 - x(t)}{x_0}\right)^\lambda, \quad P_y(t) = 1 - \left(\frac{y_0 - y(t)}{y_0}\right)^\mu, \quad (4.2.9)$$

где  $\lambda > 0$  и  $\mu > 0$  – параметры. Тогда получим следующую модификацию модели Осипова-Ланчестера:

$$\frac{dx(t)}{dt} = -a_y y(t) P_y(t), \quad \frac{dy(t)}{dt} = -a_x x(t) P_x(t). \quad (4.2.10)$$

В.В. Бреер в статье «Пороговые модели боевых действий» [62] рассмотрел следующие три возможных случая уклонения бойцов от боя:

- сдача в плен противнику;
- временное уклонение от борьбы;
- дезертирство.

Для количественного учета поведения бойцов им использовались пороговая модель (если боец видит определенную долю сражающихся вместе с ним товарищей, он участвует в бою, иначе – уклоняется, см. также [280]) и модель конформного поведения Грановеттера (см. [462]).

Недостатком перечисленных моделей является отсутствие оценок параметров по данным военной статистики.

Частично восполним этот недостаток на примере анализа 38 сражений, статистические данные по которым представлены в работе [274]. В таблице 4.2.2 приведены эти данные, причем числовые характеристики отсортированы не по сильнейшей стороне, а по победившей.

Таблица 4.2.2. Характеристики сражений XIX – начала XX вв.

| №  | Сражение      | Победившая сторона |           |      | Проигравшая сторона |           |      |
|----|---------------|--------------------|-----------|------|---------------------|-----------|------|
|    |               | $x_0$              | $x_0 - x$ | Плен | $y_0$               | $y_0 - y$ | Плен |
| 1  | Аустерлиц     | 75                 | 63        |      | 83                  | 56        |      |
| 2  | Тена          | 74                 | 70        |      | 43                  | 31        | 15   |
| 3  | Ауэрштедт     | 30                 | 23        |      | 48                  | 40        | 4    |
| 4  | Прейсиш Эйлау | 80                 | 55        |      | 64                  | 38        |      |
| 5  | Фридланд      | 85                 | 73        |      | 60                  | 45        |      |
| 6  | Асперн        | 75                 | 50        |      | 70                  | 35        |      |
| 7  | Ваграм        | 160                | 135       |      | 124                 | 99        |      |
| 8  | Бородино      | 130                | 95        |      | 103                 | 63        |      |
| 9  | Березина      | 75                 | 69        |      | 45                  | 30        | 20   |
| 10 | Люцен         | 157                | 142       |      | 92                  | 80        |      |
| 11 | Бауцен        | 163                | 145       |      | 96                  | 84        |      |
| 12 | Дрезден       | 125                | 110       |      | 160                 | 140       | 10   |
| 13 | Кацбах        | 75                 | 72        |      | 65                  | 53        | 18   |
| 14 | Кульм         | 46                 | 37        |      | 35                  | 25        | 12   |
| 15 | Дениевиц      | 57                 | 48        |      | 70                  | 61        | 9    |
| 16 | Лейпциг       | 300                | 250       |      | 200                 | 140       | 30   |
| 17 | Ганау         | 75                 | 60        |      | 50                  | 41        |      |
| 18 | Краон         | 30                 | 22        |      | 18                  | 13        |      |

| №  | Сражение     | Победившая сторона |         |      | Проигравшая сторона |         |      |
|----|--------------|--------------------|---------|------|---------------------|---------|------|
|    |              | $x_0$              | $x_0-x$ | Плен | $y_0$               | $y_0-y$ | Плен |
| 19 | Лаон         | 100                | 98      |      | 45                  | 39      | 3    |
| 20 | Линьи        | 120                | 109     |      | 85                  | 67      |      |
| 21 | Ватерлоо     | 100                | 78      |      | 72                  | 40      |      |
| 22 | Грохово      | 72                 | 63      |      | 56                  | 44      |      |
| 23 | Альма        | 62                 | 59      |      | 34                  | 28      |      |
| 24 | Черная речка | 60                 | 58      |      | 56                  | 48      |      |
| 25 | Инкерман     | 63                 | 57      |      | 90                  | 78      |      |
| 26 | Маджента     | 54                 | 49      |      | 58                  | 48      |      |
| 27 | Сольферино   | 150                | 132     |      | 170                 | 150     |      |
| 28 | Кустоцца     | 70                 | 62      |      | 51                  | 43      |      |
| 29 | Кениггрец    | 222                | 212     |      | 215                 | 172     |      |
| 30 | Верт         | 100                | 90      |      | 45                  | 40      | 9    |
| 31 | Марс ла Тур  | 125                | 109     |      | 65                  | 49      |      |
| 32 | Гравелот     | 220                | 200     |      | 130                 | 118     |      |
| 33 | Седан        | 245                | 236     |      | 124                 | 107     | 107  |
| 34 | Мец          | 200                | 194     |      | 173                 | 153     | 153  |
| 35 | Аладжа       | 60                 | 58      |      | 36                  | 21      | 7    |
| 36 | Лаоян        | 120                | 96      |      | 150                 | 132     |      |
| 37 | Шахе         | 157                | 137     |      | 212                 | 172     |      |
| 38 | Мукден       | 280                | 210     |      | 330                 | 271     |      |

В таблице  $x_0$  и  $y_0$  – начальные численности победившей и проигравшей стороны,  $(x_0 - x)$  и  $(y_0 - y)$  – потери войск убитыми и ранеными к концу сражения, без учета пленных.

Вслед за М.П. Осиповым положим, что боевые возможности (включая моральные характеристики) войск сторон одинаковы. Сложным остается вопрос, каковы потери проигравшей стороны в ходе боя, и каковы потери после утери боеспособности. Сделаем допущение, что потери убитыми и ранеными происходили на этапе, когда войска организованно сражались, а после утери боеспособности часть проигравших сдалась в плен. Из таблицы видно, что в двух сражениях (Седан и Мец) проигравшая сторона (французы) полностью капитулировала.

Тогда вероятности ведения сторонами боевых действий будут равны (моральные характеристики сторон одинаковы):

$$P_x(t) = 1 - \left( \frac{x_0 - x(t)}{x_0} \right)^\lambda, \quad P_y(t) = 1 - \left( \frac{y_0 - y(t)}{y_0} \right)^\lambda. \quad (4.2.11)$$

В каждом сражении победившая сторона, несмотря на понесенные потери, не утратила боеспособность, тогда как проигравшая сторона была вынуждена прекратить сражение вследствие понесенных потерь. Составим

функцию правдоподобия:

$$L(\lambda) = \prod_{i=1}^n \left[ 1 - \left( \frac{x_{i0} - x_i}{x_{i0}} \right)^\lambda \right] \left( \frac{y_{i0} - y_i}{y_{i0}} \right)^\lambda, \quad (4.2.12)$$

где  $n$  – количество сражений (объем выборки). Первый сомножитель в произведении – вероятность ведения боя победившими, второй – вероятность утраты боеспособности проигравшими.

Максимизируя функцию  $L(\lambda)$ , находим  $\lambda \approx 3$ . На рис. 4.2.2 показаны графики зависимости вероятности утраты боеспособности от доли понесенных потерь при значениях параметра  $\lambda = 3$  и  $\lambda = 2$ .

Из рисунка и расчетов видно, что при  $\lambda = 3$  и доле потерь 0,8 вероятность утраты боеспособности равна 0,5. Иными словами, войны и сражения XIX – начала XX вв. подтверждают действующие нормативы – «уровень боевой способности общевойсковых соединений, частей и подразделений отражает расчётную степень реализации боевых возможностей и оценивается по четырём степеням: боеспособные (имеют не менее 75% боеспособных орг. структур); ограниченно боеспособные (50 – 75%); частично боеспособные (30 – 50%); небоеспособные (менее 30% боеспособных орг. структур)»<sup>1</sup>.

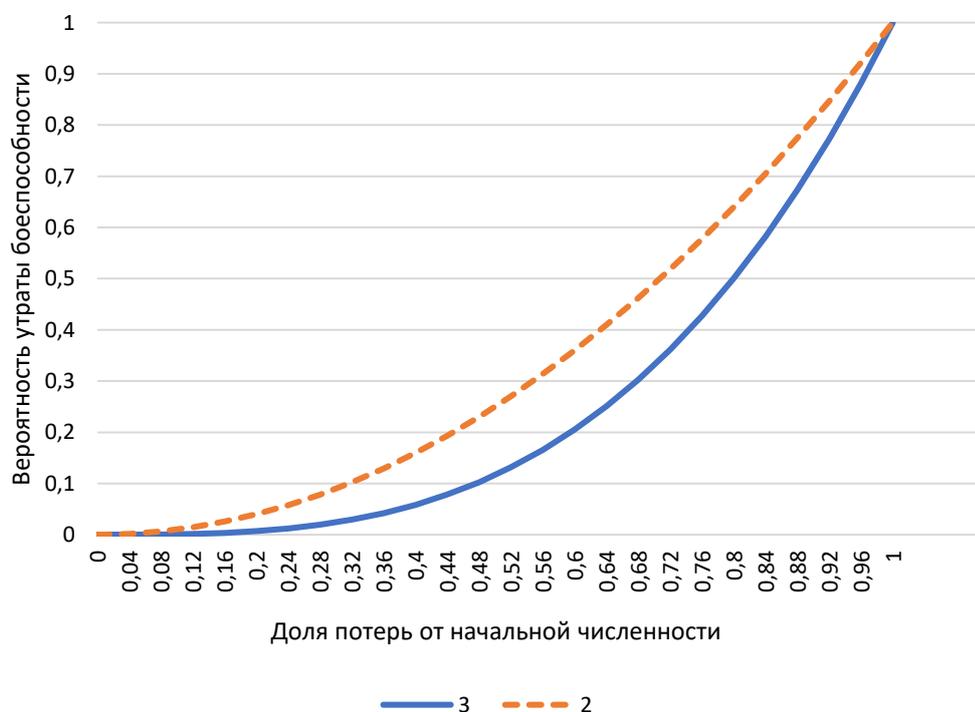
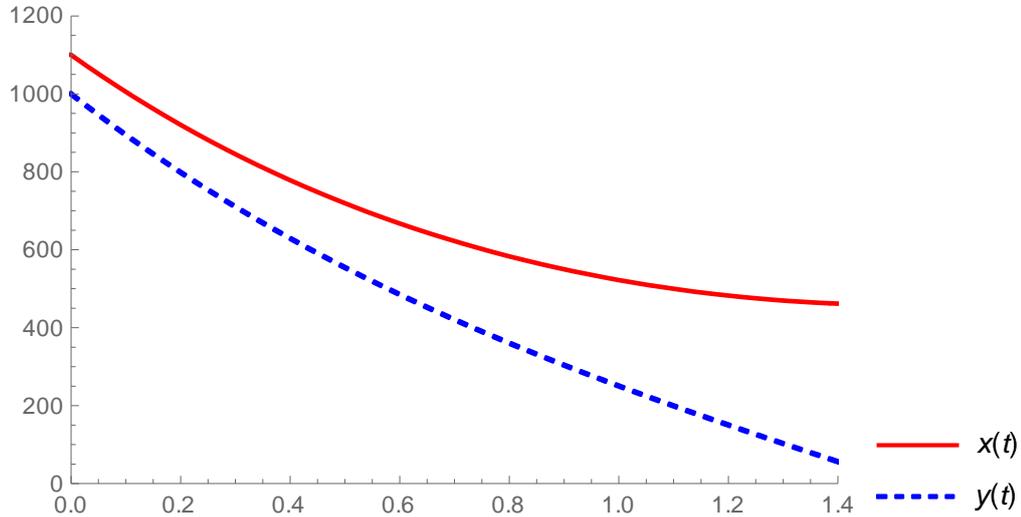


Рис. 4.2.2. Зависимость вероятности утраты боеспособности

<sup>1</sup> Боевая способность. – URL: <https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=3465@morfDictionary> (дата обращения – 1.03.2024).

*от доли понесенных потерь убитыми и ранеными*

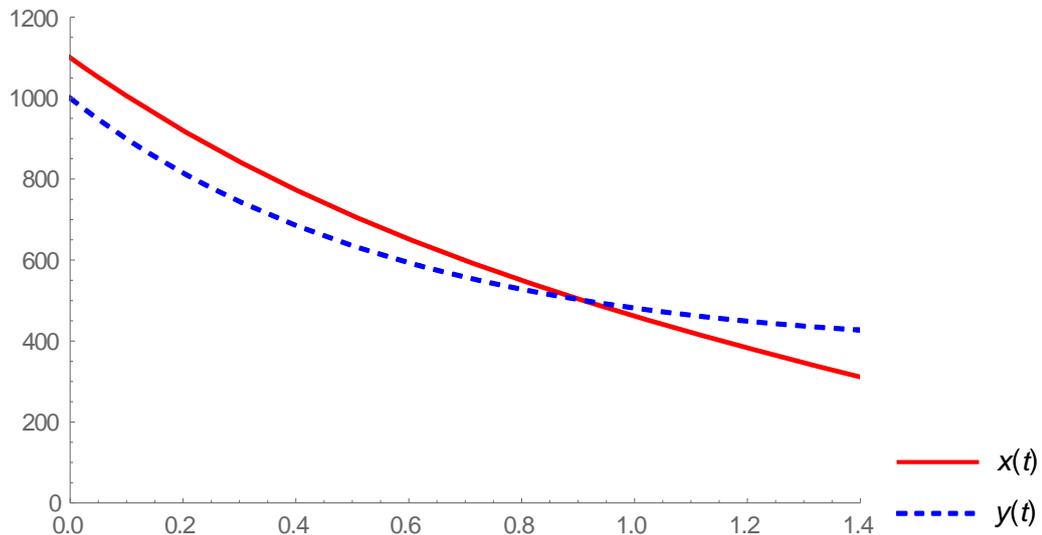
Рассмотрим пример. Пусть  $x_0 = 1200$ ,  $y_0 = 1000$ ,  $a_x = a_y = 1$ ,  $\lambda = 3$ ,  $\mu = 1$ . На рис. 4.2.3 показана динамика боя без учета морального фактора, модель (4.2.1).



*Рис. 4.2.3. Модель динамики боя без учета морального фактора*

На рис. 4.2.4 показана динамика боя с учетом морального фактора, модель (4.2.10).

Из рисунка видно, что вторая сторона за счет морального фактора (способности выдерживать потери) побеждает, неся в итоге меньшие потери.



*Рис. 4.2.4. Модель динамики боя с учетом морального фактора*

Таким образом, выше рассмотрены простейшие расширения модели Осипова-Ланчестера, позволяющие учитывать в них моральный потенциал участников боевых действий.

### 4.2.3. Учет действий разнородных группировок войск

Учет эффективностей применения различных видов оружия (винтовок, пулеметов, орудий) в уравнениях боя впервые выполнил М.П. Осипов.

Пусть первая сторона имеет  $m$  типов боевых единиц, а вторая –  $n$ , оперативное построение (боевой порядок) и возможности оружия отражаются следующими выражениями [79; 566]:

$$\varphi_{ij} = \frac{x_{ij}(t)}{x_i(t)}, \quad \sum_{j=1}^n \varphi_{ij} = 1, \quad (4.2.13)$$

$$\phi_{ji} = \frac{y_{ji}(t)}{y_j(t)}, \quad \sum_{i=1}^m \phi_{ji} = 1, \quad (4.2.14)$$

где:  $x_i(t)$  – количество боевых единиц  $i$ -го типа ( $i = 1, \dots, m$ ) первой стороны;  $y_j(t)$  – количество боевых единиц  $j$ -го типа ( $j = 1, \dots, n$ ) второй;  $x_{ij}(t)$  ( $y_{ji}(t)$ ) – количество единиц  $i$ -го типа первой стороны, назначенных для поражения единиц противника  $j$ -го типа (количество единиц  $j$ -го типа второй стороны, назначенных для поражения единиц противника  $i$ -го типа)

Тогда уравнения Осипова-Ланчестера примут вид:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = -\sum_{j=1}^n \phi_{ji} b_{ji} y_j(t), \quad \frac{dy_j(t)}{dt} = -\sum_{i=1}^m \varphi_{ij} a_{ij} x_i(t), \quad (4.2.15)$$

где:  $a_{ij}$  – параметр поражающей скорострельности единицы  $i$ -го типа первой стороны по единице  $j$ -го типа второй;  $b_{ji}$  – параметр поражающей скорострельности единицы  $j$ -го типа второй стороны по единице  $i$ -го типа первой.

Отметим, что модели с разнородными группировками являются скорее нормативными, чем описательными. Оптимальный порядок поражения единиц противника по типам рассмотрен, например, в работе [514].

С использованием данных военной статистики по операции США в Ираке «Буря в пустыне» в работе [504] выполнены расчеты с использованием дискретной модели. Операция разбита на 14 оперативных циклов продолжительностью по 3 суток каждый.

Уравнения для коалиционных сил во главе США:

$$\sum_{i=1}^m X_i^{t+1} = \sum_{i=1}^m X_i^t - \sum_{j=1}^n B_{ji}^t Y_j^t, \quad 0 < B_{ji}^t < 1, \quad t \in [0, T] \quad (4.2.16)$$

и уравнения для армии Ирака:

$$\sum_{j=1}^n Y_j^{t+1} = \sum_{j=1}^n Y_j^t - \sum_{i=1}^m A_{ij}^t X_i^t, \quad 0 < A_{ij}^t < 1, \quad t \in [0, T]. \quad (4.2.17)$$

Боевые возможности на каждом цикле вычислялись по формулам:

$$A_{ij}^t = m_{ij} k_{ij} p_{ij}, \quad B_{ji}^t = n_{ji} z_{ji} q_{ji}, \quad (4.2.18)$$

где:  $m_{ij}$  ( $m_{ji}$ ) – количество ударов (выстрелов) по противнику в одном цикле;  $k_{ij}$  ( $z_{ji}$ ) – количество боевых единиц;  $p_{ij}$  ( $q_{ji}$ ) – вероятность поражения цели.

Начальные численности сторон (по группам боевых единиц) приведены в таблицах 4.2.3 и 4.2.4 [504].

Таблица 4.2.3. Начальные численности воздушных сил коалиции (X) и армии Ирака (Y)

|       |          |          |          |          |          |          |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $X_F$ | $X_B$    | $X_{ST}$ | $X_{EW}$ | $X_{FA}$ | $X_{SE}$ | $X_{AH}$ |
| 205   | 420      | 40       | 59       | 2150     | 450      | 681      |
| $Y_F$ | $Y_{FB}$ | $Y_{FA}$ | $Y_{EW}$ | $Y_{SE}$ | $Y_{RE}$ | $Y_{AH}$ |
| 56    | 164      | 908      | 20       | 12       | 32       | 442      |

Сокращения индексов: F – истребитель, FB – истребитель-бомбардировщик, B – бомбардировщик, ST – стелс-бомбардировщик F-117A, EW – самолет РЭБ, FA – истребитель-штурмовик, SE – средство подавления ПВО противника, AH – ударный вертолет, RE – н/д.

Таблица 4.2.4. Начальные численности сухопутных войск и ПВО коалиции (X) и армии Ирака (Y)

|           |           |           |           |       |           |            |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-----------|------------|
| $X_{ADL}$ | $X_{ADM}$ | $X_{ADS}$ | $X_{WMD}$ | $X_A$ | $X_E$     | $X_{ARM}$  |
| 96        | 44        | 0         | 0         | 4550  | 1 110 000 | 8500/15000 |
| $Y_{ADL}$ | $Y_{ADM}$ | $Y_{ADS}$ | $Y_{WMD}$ | $Y_A$ | $Y_E$     | $Y_{ARM}$  |
| 18        | 270       | 558       | 110       | 4140  | 1 106 000 | 7000/11200 |

Сокращения индексов: ADL (ADM, ADS) – средство ПВО большой, средней и малой дальности, WMD – оружие массового поражения, A – артиллерия, E – пехота, ARM – танк, БТР.

Результаты расчетов позволили выявить ограничения и сделать следующие содержательные выводы [504].

Первое. В модели не учитывались удары США по объектам гражданской инфраструктуры и нетипичные действия (например, авиация Ирака была в основном уничтожена не в ходе воздушных боев, а в результате ударов по аэродромам, часть боевых самолетов перелетела в Иран). Отсутствуют данные по эффективности комплексов ПВО США «Пэтриот».

Второе. Верификация модели проверялась путем сравнения на каждом цикле расчетных данных с результатами боевых действий.

Третье. Действия иракской армии носили пассивный характер, имели слабую противовоздушную оборону и не вели боевые действия в городах.

Четвертое. Если бы армия Ирака навязала коалиции боевые действия в городах и активные наступательные действия на других участках, то у нее был бы шанс нанести коалиции неприемлемые для нее потери.

Таким образом, уравнения Осипова-Ланчестера и их расширения для учета действий разнородных группировок не утратили своей актуальности и в наше время. Их целесообразно использовать в моделях тактического, оперативного и стратегического уровней для прогноза хода и исхода боевых действий, а также для обоснования эффективности существующих и перспективных систем вооружений.

#### ***4.2.4. Применение уравнений Осипова-Ланчестера в системах моделирования***

С целью более реалистичного описания боевых действий, во-первых, исследуются различные расширения модели динамики боя (см., например работу «Modeling the Lanchester Laws with System Dynamics» [414]), во-вторых, разрабатываются программные комплексы и системы моделирования.

Компанией MITRE с 2002 г. ведется разработка и поддержка комплекса (федерации) JTLS-JCATS моделей военных и боевых действий стратегического и тактического уровней [425].

Имитационная система моделирования JTLS (Joint Theater Level Simulation) может работать как на отдельном компьютере, так и в глобальной информационно-управленческой среде, объединяющей формирования армии США и других стран НАТО. Ее назначение:

- исследование, развитие и оценка планов применения группировок вооруженных сил в различных условиях обстановки и совершенствование тактики применения объединенных (межвидовых) и многонациональных формирований;
- сравнительная оценка альтернативных вариантов боевого применения войск (сил);
- анализ структуры и состава боевых и обеспечивающих формирований, имеющих на вооружении различные образцы ВВТ;
- проведение командно-штабных учений, военных игр и других мероприятий в системе оперативной подготовки объединенных и коалиционных (многонациональных) штабов и др.

Наиболее эффективно применение системы JTLS во взаимодействии с имитационной системой тактического уровня JCATS (Joint Conflict and Tactical Simulation).

В системе предусмотрено введение и сохранение следующей исходной

информации [225]:

- цифровые карты местности ТВД;
- боевой и численный состав, возможности формирований вооруженных сил, иррегулярных и невоенных формирований;
- ТТХ и возможности образцов ВВТ;
- возможности по перегруппировке и развертыванию войск и др.

Введение в систему исходных данных «с нуля» может занимать 6-8 месяцев. В сетевом режиме работы на ввод недостающих данных может потребоваться 2-3 суток. С помощью архитектуры высокого уровня JTLS связана с реальными системами управления, связи, разведки, РЭБ и информации ВС США и их союзников по НАТО.

Прогноз хода и исхода боевых действий выполняется с использованием смешанных разнородных дискретных уравнений Осипова-Ланчестера и аналитико-имитационных моделей для расчета перемещений войск, разведки и поражения целей, материально-технического обеспечения. Предусмотрено влияние на результаты моделирования условий окружающей среды (климата, погоды, местности и пр.), времени года и суток. Действия формирований более высокого уровня иерархии (агрегации) имитируются с учетом конкретных возможностей по огневому поражению входящих в их состав частей и подразделений с детальной оценкой полученных результатов. Перед атакой противника должно быть точно установлено его местоположение. В противном случае требуется доразведка целей.

Наземный модуль позволяет моделировать действия сухопутных формирований ВС, в том числе имитировать [225]:

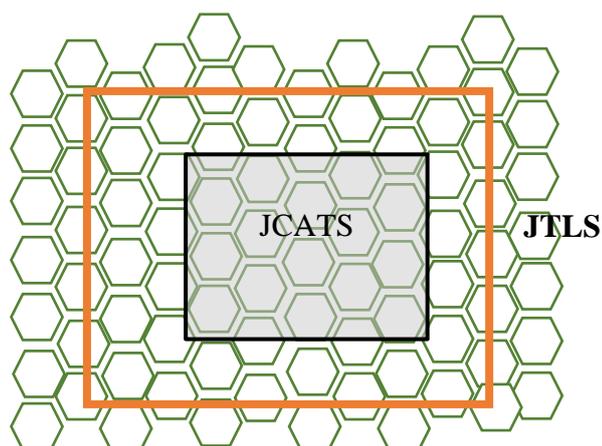
- действия штатных, приданных и поддерживающих сил и средств; действия многонациональных сил;
- атаку переднего края противника, а также отход и вывод войск из окружения;
- различные варианты ведения обороны (заблаговременно подготовленную, поспешно занятую, маневренную и др.);
- перемещения и маневр войск (сил), прокладку новых маршрутов и дорог;
- огонь прямой наводкой и стрельбу с закрытых огневых позиций артиллерии, контрбатареиную борьбу;
- непосредственную авиационную поддержку;
- действия систем боевого управления и связи;
- действия инженерных частей и подразделений; постановку мин артиллерийскими системами с воздуха и строевым расчетом; расчистку минных

заграждений;

- действия ССО, в том числе и психологических операций, подразделений по связям с гражданской администрацией;
- изменение (корректировку) правил ведения боевых действий.

Учет возможных потерь ведется как от непосредственного огневого воздействия «противника» и минно-взрывных заграждений, так и в результате ядерного и химического заражения местности.

При интеграции моделей разного масштаба ведения боевых действий в единую федерацию актуальной задачей является агрегирование. В оперативно-стратегических моделях и моделях уровня ТВД минимальной (неделимой) тактической единицей является рота или батальон, тогда как в тактических моделях – отдельные боевые единицы. В модели JTLS используется шестиугольная сетка (рис. 4.2.5) на игровом поле, с помощью которой описываются характеристики местности (высота, транспортная доступность, растительность и т. д.).



*Рис. 4.2.5. Границы поля боя моделей JTLS-JCATS*

Когда объект выходит за внешний периметр JCATS, он передается для управления в систему JTLS. На границе двух прямоугольников используются специальные функции и протоколы для управления боевыми единицами.

Описание средств моделирования боевых действий JWARS и JTLS можно также найти в монографии [210, с. 340-355]. Возможности и характеристики имитационных моделирующих комплексов Сухопутных войск представлены в работах [137; 293], информационно-моделирующих сред в интересах обучения – в [64].

Помимо проблем информационного и технического характера, в системах имитации и управления боевыми действиями центральной проблемой была и остается разработка математических моделей, начиная с физического (характеристики образцов ВВТ, используемые физические поля и т. д.) и

операционного (перемещения, взаимодействия, ведение огня отдельными единицами и группами) уровней, и заканчивая тактическим, оперативным и стратегическим уровнями.

### **4.3. Теоретико-игровые модели боевых действий**

Теоретико-игровые модели боевых действий относятся к классу базовых моделей, так как предназначены для обоснования основных элементов замысла на операцию (бой): направления главного и других ударов и направление сосредоточения основных усилий, а также оперативное построение войск (боевой порядок).

Структура настоящего раздела такова. Сначала дается краткий обзор теоретико-игровых моделей боя, затем рассматриваются базовая теоретико-игровая модель «наступление-оборона» и ее возможные расширения.

#### ***4.3.1. Обзор теоретико-игровых моделей боя***

Теория игр (в основном антагонистических) активно используется для моделирования военных действий начиная с конца 40-х – начала 50-х годов XX века и до наших дней. Причем первоначально учебники и монографии по теории игр содержали примеры приложений этой теории в основном именно к военному делу (см. [130; 131; 536]), а начиная с конца 1980-х годов большинство примеров стало браться из области экономики. Сейчас эта тенденция за редкими исключениями (см. [74, с. 61-69]) абсолютно доминирует [253].

Обзор теоретико-игровых исследований в военной сфере (основания классификации: разделы теории игр, пространства ведения боевых и специальных действий) можно найти в [253; 477], основные понятия теории игр даны в приложении 2.

Эдвин Хо и др. отмечают движущие факторы применения теории игр в сфере обороны и безопасности: во-первых, теория игр обеспечивает естественную основу для быстрого перевода политического решения высокого уровня в оптимальную стратегию, сформулированную в количественных терминах (выигрыш-затраты, выигрыш-потери, риск и т. д.), во-вторых, создает условия для принятия оптимальных (рациональных) решений в соответствии с назначенными критериями, в-третьих, применение современного математического

аппарата и технологий искусственного интеллекта обеспечивает превосходство над противником в принятии решений и действиях [477].

Наибольшее количество прикладных моделей получено методами *классической теории игр* (некооперативные игры). Методы антагонистических (биматричных) игр используется для решения следующих задач:

- организация, планирование и проведение военных операций [575], распределение сил и средств по пунктам обороны [107; 306], выбор оптимальных группировок вооруженных сил и систем вооружения [78; 79; 136; 332; 371];

- выбор оптимальных моментов или дистанций открытия огня (игры типа дуэлей) [136; 339].

Также известны «политологические» модели анализа причин войн [430; 483], модели гонки вооружений и международного сотрудничества в военной сфере [528].

*Дифференциальные игры и игры поиска* («поиск в условиях конфликта») позволяют решать следующий класс задач: поиск истинной цели в наблюдаемом составе группы целей, включая ложные; поиск цели при подавленном канале наблюдений и др. [6; 133].

«*Неклассические*» разделы теории игр, которые могут использоваться в военной сфере:

- иерархические игры [176];
- модели коллективного поведения [177];
- рефлексивные игры и метаигры [176; 204; 479];
- игры на сетях и сетевые игры [209; 251];
- алгоритмическая (вычислительная) теория игр [407];
- поведенческая теория игр [432];
- когнитивные игры [198; 250].

Один из первых примеров приложений теории игр к военному делу – это *игра полковника Блотто*<sup>1</sup> (ИПБ). ИПБ называется игра двух лиц, в которой игроки однократно, одновременно и независимо (не зная выбора оппонента) распределяют свои ограниченные ресурсы между конечным числом объектов (полей сражений или пунктов).

Обозначим через  $N = \{1, \dots, n\}$  множество объектов (пунктов, районов), через  $x = (x_1, \dots, x_n)$  – действие первого игрока, через  $y = (y_1, \dots, y_n)$  – действие второго игрока, где  $x_i \geq 0$  ( $y_i \geq 0$ ) – количество ресурса, выделенного первым (вторым) игроком на  $i$ -й объект,  $i = 1, \dots, n$ . Ограниченность ресурсов сторон

<sup>1</sup> Игра названа в честь мифического персонажа из работы Гросса и Вагнера 1950 г.

отражена условиями:

$$\sum_{i \in N} x_i \leq R_x, \quad \sum_{i \in N} y_i \leq R_y. \quad (4.3.1)$$

**Игра полковника Блотто, аукционная модель.** В рамках аукционной модели победу на объекте одерживает игрок, выделивший на него большее количество ресурсов (в случае равенства ресурсов каждый из игроков одерживает победу с вероятностью  $1/2$ ). Ценность  $i$ -го объекта для первого (второго) игрока обозначим через  $X_i$  ( $Y_i$ ). Тогда выигрыши игроков в аукционной модели будут определяться следующим образом:

$$f_x(x, y) = \sum_{i \in N} X_i I(x_i > y_i) + \frac{1}{2} \sum_{i \in N} X_i I(x_i = y_i), \quad (4.3.2)$$

$$f_y(x, y) = \sum_{i \in N} Y_i I(y_i > x_i) + \frac{1}{2} \sum_{i \in N} Y_i I(x_i = y_i),$$

где  $I(\cdot)$  – функция-индикатор. Более общим является случай, когда ограничения типа (4.3.1) отсутствуют, но из выигрышей (4.3.2) вычитаются затраты, монотонные по суммарному количеству использованного игроками ресурса.

Случаи  $n = 1$  и  $n = 2$  являются тривиальными. Действительно, при  $n = 1$  побеждает игрок, обладающий бóльшим количеством ресурса (в случае равенства ресурсов победа каждого равновероятна). При  $n = 2$  оптимальной стратегией каждого игрока является приоритетное выделение ресурса на наиболее ценный для него объект.

Простейшим является *симметричный* ( $X_i = Y_i, i \in N, R_x = R_y$ ) вариант *дискретной* (ресурсы игроков дискретны) ИПБ, являющейся матричной игрой (с нулевой суммой). Впервые решение этой игры (равновесие Нэша в смешанных стратегиях) для случая  $n = 3$  было описано в 1921 г.; в 1950 г. были найдены решения для симметричного случая для произвольного конечного  $n$  и для случая  $X_i = Y_i, i \in N, R_x \neq R_y$  при  $n = 2$ . Следующим шагом была частичная характеристика равновесия Нэша для случая  $X_i = Y_i, i \in N, R_x \neq R_y$  при произвольном конечном  $n$  (1958 г.). В дальнейшем, как правило, исследователи ограничивались либо дискретным, либо симметричным непрерывным случаями [253].

**Игра полковника Блотто, вероятностная модель.** В вероятностной модели ИПБ вероятность  $p_x(x_i, y_i)$  победы первого игрока на  $i$ -м объекте не зависит от других объектов и «пропорциональна» количеству выделенного им на этот объект ресурса и «обратно пропорциональна» взвешенной сумме ресурсов, выделенных на этот объект обоими игроками:

$$p_x(x_i, y_i) = \frac{\alpha_i(x_i)^{r_i}}{\alpha_i(x_i)^{r_i} + (y_i)^{r_i}}, \quad p_y(x_i, y_i) = 1 - p_x(x_i, y_i), \quad (4.3.3)$$

$$r_i \in (0; 1], \quad \alpha_i > 0, \quad p_x(x_i = 0, y_i = 0) = \frac{\alpha_i}{\alpha_i + 1}.$$

Содержательно коэффициенты  $\{\alpha_i\}$  позволяют соизмерять эффективности использования игроками ресурсов на одном и том же объекте (см. раздел 3.2 настоящей монографии).

Выигрыши игроков в вероятностной модели определяются следующим образом:

$$F_x(x, y) = \sum_{i \in N} X_i p_x(x_i, y_i), \quad F_y(x, y) = \sum_{i \in N} Y_i p_y(x_i, y_i). \quad (4.3.4)$$

Равновесием Нэша в чистых стратегиях  $(x^*, y^*)$  является пара векторов, удовлетворяющих условиям (4.3.1), таких, что  $\forall (x, y)$ , также удовлетворяющих условиям (4.3.1), выполнено

$$F_x(x^*, y^*) \geq F_x(x, y^*), \quad F_y(x^*, y^*) \geq F_y(x^*, y). \quad (4.3.5)$$

Для частного случая ( $\alpha_i = r_i = 1, X_i = Y_i = V_i$ ) получено следующее решение игры с целевыми функциями (4.3.4) [253]:

$$x_i^* = \frac{V_i}{V} R_x, \quad y_i^* = \frac{V_i}{V} R_y, \quad V = \sum_{i=1}^n V_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (4.3.6)$$

$$F_x(x^*, y^*) = V \frac{R_x}{R_x + R_y}, \quad F_y(x^*, y^*) = V \frac{R_y}{R_x + R_y}. \quad (4.3.7)$$

То есть игрокам выгодно делить свой ресурс пропорционально ценностям объектов. При этом их выигрыш пропорционален суммарным ресурсам. Отметим, что равновесные действия игроков (см. выражения (4.3.6)) зависят только от имеющихся у них суммарных ресурсов и ценностей объектов. Иными словами, для нахождения оптимальных решений не надо знать имеющийся ресурс у оппонента.

Самостоятельный интерес представляет исследование различий в оценках игроками одних и тех же объектов – модели стратегической и информационной рефлексии в ИПБ описаны в [177].

**Модель «нападение-защита».** Модель Ю.Б. Гермейера «нападение-защита», являющаяся модификацией модели О. Гросса, определена и исследована во «Введении в теорию исследования операций» [107]. Имеется  $N = \{1, \dots, n\}$  множество охраняемых объектов,  $x = (x_1, \dots, x_n)$  и  $y = (y_1, \dots, y_n)$  – действия нападающего и защитника (распределение бесконечно делимых

ресурсов по объектам), на которые наложены ограничения

$$\sum_{i \in N} x_i = R_x, \quad \sum_{i \in N} y_i = R_y. \quad (4.3.8)$$

Пусть  $s_i$  – количество средств нападающих, которое может уничтожить одна единица средств защиты на  $i$ -м объекте. Если  $x_i > s_i y_i$ , то через  $i$ -й объект прорывается  $x_i - s_i y_i$  средств нападающих. Если  $x_i \leq s_i y_i$ , то через этот объект нападающие не прорвутся. Целевая функция нападающих (общее количество их средств, прорвавшихся через все объекты):

$$F(x, y) = \sum_{i \in N} \max(x_i - s_i y_i; 0). \quad (4.3.9)$$

Стороны принимают решения однократно, одновременно и независимо (не зная выбора оппонента). Доказано, что оптимальная чистая стратегия защиты равна (и она не зависит от действий нападающих и от имеющихся у них ресурса) [107]:

$$y_i^* = \frac{R_y}{s_i \sum_{j \in N} \frac{1}{s_j}}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (4.3.10)$$

Оптимальная стратегия нападающих заключается в нанесении удара всеми силами по одному из объектов. Причем выбор объекта для удара осуществляется с вероятностями (смешанная стратегия):

$$p_i^* = \frac{1}{s_i \sum_{j \in N} \frac{1}{s_j}}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (4.3.11)$$

Из последнего выражения видно, что оптимальная стратегия нападающих зависит только от возможностей по применению оружия на объектах (свойства местности, их защищенность и т. д.) и не зависит от решения защитников и от имеющегося у них ресурса.

Значение игры (общее количество средств нападающих, прорвавшихся через все объекты) равно:

$$F(p^*, y^*) = \max \left[ R_x - R_y \left( \sum_{i \in N} \frac{1}{s_i} \right)^{-1}; 0 \right]. \quad (4.3.12)$$

Ознакомиться с подробным решением задачи Ю.Б. Гермейера «нападение-защита» можно по учебному пособию [74].

### 4.3.2. Модель «наступление-оборона». Постановка задачи

Важнейшей проблемой подготовки боя (сражения, операции) является нахождение оптимального распределения сил и средств по фронту (между пунктами, районами, участками, полосами) и между задачами (ближайшей и последующей). Названная проблема особенно актуальна в условиях, когда разнородные группировки (тактические группы) формируются под конкретную задачу и с учетом особенностей местности.

Основными видами боевых действий являются наступление и оборона. Встречный бой является разновидностью наступательного боя, в котором обе стороны стремятся выполнить поставленную задачу наступлением. Перечисленные виды боевых действий и являются предметом модели «наступление-оборона».

Пусть имеется  $n$  обороняемых пунктов (районов, участков, полос) на переднем крае обороны с номерами  $i = 1, \dots, n$ , где возможен прорыв средствами наступающих (рис. 4.3.1 – два пункта обороны)<sup>1</sup>.

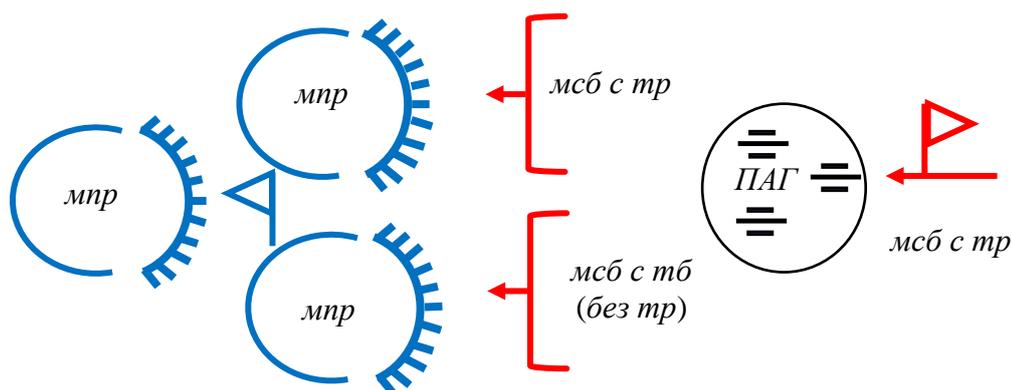


Рис. 4.3.1. Боевые порядки сторон (вариант)

Как правило, боевые порядки строятся в два эшелона или один (с выделением резерва)<sup>2</sup>. Боевая задача в наступлении обычно разделяется на ближайшую и последующую (дальнейшую). *Ближайшая задача* заключается в нанесении противнику огневого поражения, разгроме его сил в определённой полосе (районе) и овладении рубежом (районом, объектом), с захватом которого создаются условия для дальнейшего наступления. Без ограничения

<sup>1</sup> Отдельного описания требует задача определения районов ответственности (разграничительных линий) противника и своих подчиненных подразделений. При отсутствии достаточных данных следует руководствоваться нормативными требованиями, учитывать возможности противника и характеристики местности.

<sup>2</sup> При трех эшелонном построении войск их условно можно разделить на два, предназначенные для решения ближайшей и последующей задач. При наличии войск в полосе обеспечения их условно можно отнести к первому эшелону и т. д.

общности будем считать, что ближайшая задача заключается в прорыве полосы обороны противника (позиций его первого эшелона). *Последующая задача* – развитие наступления после выполнения ближайшей задачи, разгром противостоящего противника в глубине обороны и овладение определённым рубежом.

Будем считать, что в обороне ближайшая задача – это недопущение прорыва пунктов обороны, а последующая – нанесение вторым эшелоном (резервом) контрудара по вклинившемуся противнику с целью восстановления обороны.

Обозначим  $R_x$  и  $R_y$  – количества боевых средств у наступающих (игрок Н) и обороняющихся (игрок О). Ресурсы  $R_x$  и  $R_y$  полагаются бесконечно делимыми, что позволит учесть действия своих, приданных и поддерживающих единиц, когда их усилия попеременно направлены на различные пункты и задачи.

Вектор сил и средств игрока Н:

$$x = (x_1, \dots, x_n, u) \in X = \left\{ x \mid \sum_{i=1}^n x_i + u = R_x \right\}, \quad r_x = R_x - u, \quad (4.3.13)$$

где:  $x_i \geq 0$  – количество боевых единиц (ресурса), выделяемых на  $i$ -й объект;  $r_x$  – суммарное количество средств решения ближайшей задачи;  $u > 0$  – количество средств решения последующей задачи (второго эшелона).

Соответственно вектор сил и средств второй стороны (игрока О):

$$y = (y_1, \dots, y_n, w) \in Y = \left\{ y \mid \sum_{i=1}^n y_i + w = R_y \right\}, \quad r_y = R_y - w, \quad (4.3.14)$$

где:  $y_i \geq 0$  – количество боевых единиц (ресурса), выделяемых на  $i$ -й объект;  $r_y$  – суммарное количество средств решения ближайшей задачи;  $w > 0$  – количество средств решения последующей задачи (второго эшелона, резерва).

Будем рассматривать боевые действия на тактическом уровне с функцией победы игрока Н на  $i$ -м объекте (параметр масштаба  $m = 1$ , см. раздел 3.2 настоящей монографии):

$$P_x(x_i, y_i) = \frac{\beta_i x_i}{\beta_i x_i + y_i}, \quad (4.3.15)$$

где  $\beta_i$  – параметр боевого превосходства игрока Н на  $i$ -м объекте (зависит от боевых возможностей сторон, степени подготовки обороны, местности, времени суток и года и т. д.).

Задача оптимального распределения боевых единиц (ресурса) сторон по фронту (объектам) и задачам (эшелонам) выполняется в следующей последовательности:

– первый этап – при заданной частной целевой функции и фиксированных ограничениях на ресурсы находятся их оптимальные распределения по объектам (по фронту) и вычисляется частная функция значения игры (решения ближайшей задачи);

– второй этап – при заданной общей целевой функции и найденной частной функции значения игры находится распределение имеющегося у сторон ресурса между задачами (эшелонами);

– третий этап – имея оптимальное распределение по задачам, возвращаемся к первому этапу и находим конкретные значения распределений боевых единиц по объектам.

Введем следующие допущения и предположения.

Первое. Рассматривается только фаза подготовки боевых действий, на фазе ведения боевых действий используются другие модели.

Второе. Боевые единицы, выделенные на один объект, не участвуют в боевых действиях на другом объекте.

Третье. Ресурс (боекомплект) боевых единиц общего назначения (решающих обе задачи – артиллерия, ПВО и т. д.) распределяется пропорционально распределению основных боевых единиц.

Четвертое. Стороны обладают общим знанием, принимают решения одновременно и независимо. Тогда имеем антагонистическую игру (выигрыш первой стороны есть проигрыш второй) и для поиска оптимальных решений следует найти равновесие Нэша.

Введенных допущений и предположений достаточно, чтобы решить теоретико-игровую задачу «наступление-оборона».

#### ***4.3.3. Модель «наступление-оборона». Решение ближайшей задачи***

Первый этап решения задачи «наступление-оборона» – это применение классических подходов (игра полковника Блотто, модель «нападение-защита» Ю.Б. Гермейера) для решения ближайшей задачи боя (распределения сил и средств по направлениям) с использованием функции победы в бою.

Задача обоснования направлений главного и других ударов и направлений сосредоточения основных усилий может быть решена исходя из различных критериев.

**Критерий – прорыв слабейшего пункта.** Данному критерию соответствует целевая функция первой стороны:

$$f(x, y) = \max_{i=1, \dots, n} \frac{\beta_i x_i}{\beta_i x_i + y_i}, \quad (4.3.16)$$

и ограничения, наложенные на ресурсы сторон:

$$\sum_{i=1}^n x_i = r_x, \quad \sum_{i=1}^n y_i = r_y. \quad (4.3.17)$$

Доказано [390], что оптимальная стратегия обороняющихся (распределение ресурса по пунктам обороны) равна

$$y_i^* = \frac{\beta_i}{B} r_y, \quad B = \sum_{j=1}^n \beta_j, \quad i = 1, \dots, n, \quad (4.3.18)$$

а наступающие используют смешанную стратегию, распределяя весь ресурс на один из пунктов с вероятностями

$$x_i^* = \frac{\beta_i}{B} r_x, \quad B = \sum_{j=1}^n \beta_j, \quad i = 1, \dots, n. \quad (4.3.19)$$

При этом значение игры при прорыве пунктов обороны (вероятность решения ближайшей задачи) равно

$$v_1 = \frac{B r_x}{B r_x + r_y}. \quad (4.3.20)$$

**Критерий – прорыв хотя бы одного пункта.** Данному критерию соответствует целевая функция первой стороны:

$$G(x, y) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_x(x_i, y_i)) = 1 - \prod_{i=1}^n \left( \frac{y_i}{\beta_i x_i + y_i} \right) \quad (4.3.21)$$

с ограничениями (4.3.17).

Доказано [395], что оптимальные стратегии сторон и значение игры равны:

$$x_i^* = \frac{\beta_i r_x}{S(\beta_i r_x + r_y)}, \quad S = \sum_{k=1}^n \frac{\beta_k}{\beta_k r_x + r_y}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (4.3.22)$$

$$y_i^* = \frac{\beta_i r_y}{S(\beta_i r_x + r_y)}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (4.3.23)$$

$$v_2 = 1 - \prod_{i=1}^n \frac{r_y}{\beta_i r_x + r_y}. \quad (4.3.24)$$

**Критерий – средневзвешенная вероятность прорыва.** Пусть объекты характеризуются ценностями  $V_i > 0, i = 1, \dots, n$ , тогда целевые функции сторон будут иметь вид:

$$f_x(x, y) = \sum_{i=1}^n V_i \frac{\beta_i x_i}{\beta_i x_i + y_i}, \quad f_y(x, y) = \sum_{i=1}^n V_i \frac{y_i}{\beta_i x_i + y_i} \quad (4.3.25)$$

с ограничениями (4.3.17).

Доказано [253], что оптимальные стратегии сторон и значения игры равны:

$$x_i^* = \frac{V_i \beta_i r_x}{S_2 (\beta_i r_x + r_y)^2}, \quad S_2 = \sum_{k=1}^n \frac{V_k \beta_k}{(\beta_k r_x + r_y)^2}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (4.3.26)$$

$$y_i^* = \frac{V_i \beta_i r_y}{S_2 (\beta_i r_x + r_y)^2}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (4.3.27)$$

$$f_x(x^*, y^*) = \sum_{i=1}^n V_i \frac{\beta_i r_x}{\beta_i r_x + r_y}, \quad f_y(x^*, y^*) = \sum_{i=1}^n V_i \frac{r_y}{\beta_i r_x + r_y}. \quad (4.3.28)$$

Заметим, что по первому критерию (прорыв слабейшего пункта) для поиска оптимальных решений сторон не требуется знание численности противника. Достаточно знать ожидаемую типовую структуру подразделений противника, степень оборудования позиций и характеристики местности, от которых зависят значения параметров превосходства на пунктах.

Рассмотрим *пример*. Пусть  $r_x = 200$ ,  $r_y = 100$ ,  $\beta_1 = 1$ ,  $\beta_2 = 0,5$ ,  $\beta_3 = 0,5$ ,  $V_1 = V_2 = V_3 = 1/3$ ,  $n = 3$ . Оптимальные решения сторон и значения игры по трем критериям прорыва пунктов обороны представлены в таблице 4.3.1.

Таблица 4.3.1. Решения сторон по трем критериям

| Решение игры, показатели             | Критерии   |  |  |
|--------------------------------------|--|--|--|
|                                      | Прорыв слабейшего пункта обороны                                     | Прорыв хотя бы одного пункта обороны           | Средневзвешенная вероятность прорыва                 |
| Оптимальная стратегия первой стороны | Вероятности выбора пункта для удара всеми силами:<br>0,5; 0,25; 0,25 | Распределение единиц по пунктам:<br>80; 60; 60 | Распределение единиц по пунктам:<br>61,5; 69,2; 69,2 |
| Оптимальная стратегия второй стороны | Распределение единиц по пунктам:<br>50; 25; 25                       | Распределение единиц по пунктам:<br>40; 30; 30 | Распределение единиц по пунктам:<br>30,8; 34,6; 34,6 |
| Значение игры                        | 0,8  | 0,92   | 0,56; 0,44   |

По условиям обстановки для наступающих самый выгодный объект для удара – первый, там максимальное значение параметра превосходства. Этот же объект является направлением сосредоточения основных усилий обороняющейся стороны.

Если стороны будут руководствоваться первым критерием, то вероятность решения ближайшей задачи (значение игры) равна 0,8; если вторым – то 0,92. Руководствоваться третьим критерием наступающим невыгодно, так как он имеет значение игры 0,56.

При выборе командиром критерия (и связанного с ним способа действий) в конкретных условиях обстановки необходимо учитывать ряд условий.

Первое. Результаты расчетов. Как правило, игрок О будет занимать два

объекта обороны (см. рис. 4.3.1) и может оказаться, что максимальное значение игры достигается при выборе первого критерия.

Второе. Знание численного состава противника (что далеко не всегда возможно). Оптимальные решения сторон по распределению сил и средств между объектами при первом критерии (прорыв слабейшего пункта обороны) не зависят от численного состава противника, при двух других – зависят. Можно отдельно посчитать оптимальные решения при различных ожидаемых численностях противника и с учетом этого выбирать способ прорыва (удержания) обороны.

Третье. Уточнить, имеются ли благоприятные условия для скрытного сосредоточения всех сил первого эшелона для удара по одному пункту. Если таковые условия в наличии, то можно руководствоваться первым критерием.

Четвертое. Если есть сомнения в точной оценке параметра превосходства на объектах, то вполне обоснованным будет выбор второго критерия – нанести удары по всем пунктам, «нащупать» слабое место в обороне и при необходимости развить успех вводом в бой второго эшелона.

Зная решения по распределению сил сторон между объектами, можно найти оптимальное распределение ресурса между ближайшей и последующей задачами, т. е. обосновать боевой порядок сторон.

#### **4.3.4. Модель «наступление-оборона».**

##### ***Распределение сил и средств***

Критерий первой стороны в модели «наступление-оборона» (в модели встречного боя) можно сформулировать так: максимизация вероятности прорыва пунктов обороны (ближайшая задача) и захвата объекта в глубине обороны (разгрома резервов противника – последующая задача).

Если обе стороны при решении ближайшей задачи руководствуются критерием прорыва слабейшего пункта обороны, то имеем на тактическом уровне следующую целевую функцию первой стороны:

$$F(u, w) = \frac{B(R_x - u)}{B(R_x - u) + (R_y - w)} \times \frac{\delta u}{\delta u + w}, \quad 0 < u < R_x, \quad 0 < w < R_y, \quad (4.3.29)$$

где  $\delta$  – параметр боевого превосходства первой стороны при решении ею последующей задачи. Первый множитель отражает решение ближайшей задачи, второй – последующей.

Доказано [395], что сторонам целесообразно использовать чистые стратегии:

$$u^* = R_x D, w^* = R_y D, D = \frac{R_y + BR_x}{2R_y + (B + \delta)R_x}. \quad (4.3.30)$$

Содержательно значение параметра  $D$  есть доля войск, выделенных во второй эшелон (резерв). Эта доля существенно зависит от значения параметра  $\delta$  и в меньшей степени – от значения параметра  $B$  и отношения ресурсов сторон.

Найденные зависимости распределения боевых единиц обороняющейся стороны по задачам (эшелонам) соответствуют взглядам военных специалистов на подготовку и ведение оборонительных действий. В частности, когда обороняющиеся не уступают наступающим в мобильности и при поспешно занимаемой обороне организуется мобильная оборона, при которой значительная часть сил и средств (до двух третей) выделяется во второй эшелон (резерв) с целью разгрома вклинившегося противника в ходе контратак. Позиционная оборона основывается на прочном удержании в течение определенного времени заранее подготовленных в инженерном отношении оборонительных позиций, максимальном использовании огневых средств, расположении главных сил и средств в основном районе обороны соединения.

Рассмотрим *пример*. Пусть  $R_x = 600$ ,  $R_y = 300$ ,  $\beta_1 = \beta_2 = 0,5$ ,  $n = 2$ . В глубине обороны значение параметра  $\delta$  меняется от 0,1 до 1. При решении ближайшей задачи стороны руководствуются первым критерием. Оптимальные решения сторон показаны на рис. 4.3.2.

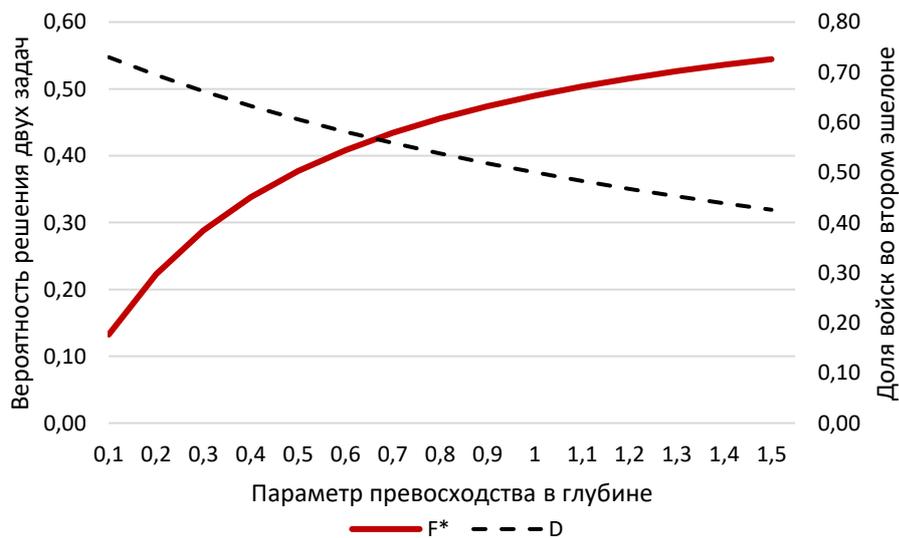


Рис. 4.3.2. Доли войск во втором эшелоне и вероятность решения боевой задачи

Из рисунка видно, что с уменьшением степени подготовки игроком  $O$  позиций в глубине обороны (и ростом параметра  $\delta$ ) вероятность решения

боевой задачи растет (сплошная линия), а доля войск во вторых эшелонах уменьшается – выполняется переход от мобильной обороны к позиционной.

В наступательных операциях важнейшей проблемой является прорыв хорошо подготовленной обороны, когда противник основные силы первого эшелона может разместить на основной или вспомогательной позициях (см. [309]). Тогда у первой стороны ближайшей задачей будет прорыв первой позиции обороны, а последующей – второй позиции. В данной задаче первой стороне целесообразно использовать критерий гарантированного результата и целевую функцию вида:

$$F(u, w) = \min \left( \frac{B(R_x - u)}{B(R_x - u) + R_y - w}; \frac{\delta u}{\delta u + w} \right) \quad (4.3.31)$$

(наступающие оценивают вероятность прорыва слабейшего пункта обороны и вероятность выполнения последующей задачи и принимают в качестве критерия минимальное значение, подлежащее максимизации) с ограничениями:

$$0 \leq u \leq R_x, \quad 0 \leq w \leq R_y, \quad B > \delta.$$

Соответственно, цель второй стороны может быть оценена критерием  $1 - F(u, w)$ .

Доказано [395], что в антагонистической игре с целевой функцией (4.3.31) оптимальное количество сил и средств, выделяемое наступающими для решения последующей задачи равно:

$$u^* = \frac{B}{B + \delta} R_x. \quad (4.3.32)$$

Доля сил и средств, выделяемых наступающими на решение последующей задачи, определяется значениями параметра  $B$  боевого превосходства наступающих при прорыве пунктов обороны и параметра  $\delta$  боевого превосходства наступающих в глубине обороны противника (при отражении его контратаки). Соответственно, оптимальное количество сил и средств, выделяемых для решения ближайшей задачи равно  $R_x - u^*$ .

Оптимальная смешанная стратегия обороняющихся заключается в следующем. Обороняющиеся с вероятностью  $\delta/(B + \delta)$  распределяют все силы и средства на второй линии обороны, а с вероятностью  $B/(B + \delta)$  – на первой. При этом значение игры равно:

$$v = \frac{\delta B R_x}{\delta B R_x + (B + \delta) R_y}. \quad (4.3.33)$$

Содержательная трактовка решения задачи распределения сил и средств при прорыве эшелонированной обороны дана Г.К. Жуковым: «У меня не было полной гарантии, что нам удастся оперативно-тактическая внезапность, а поэтому я шел на худшее и расчет строил также на худшее. Противник мог определить не только направление нашего удара, но он мог догадаться и о силе этого удара, а это главное. Не так страшно направление, как важно разгадать силу удара, чтобы своевременно подготовить соответствующие силы для противодействия. Мы не могли рассчитывать на то, что противник окажется настолько лопухим, что не будет знать ничего о готовящейся операции. Такой гарантии не мог дать ни один командующий, ни один штаб.

Нам было дано много средств, перед нами была поставлена очень ответственная задача, от выполнения которой зависели выполнение крупнейшей стратегической задачи – освобождение Польши, ликвидация восточно-прусской группировки противника, еще большее территориальное разъединение основного вражеского фронта от его прибалтийской группировки. Отсюда вы поникаете всю ответственность, которая ложилась на нас, если бы мы прошляпили, а противник сумел бы нас обмануть и если бы операция в результате этого была сорвана. У нас было немало примеров, когда противник разгадывал наши намерения и противопоставлял им свой план обмана.

Что противник мог сделать, когда бы он разгадал наш замысел? Он мог оставить в первом эшелоне обороны, т. е. на своем переднем крае, усиленное прикрытие, станковые пулеметы, ручное автоматическое оружие, отдельные пушки и даже поставить танки. Любую разведку, которую бы мы вели, он отбрасывал бы и этим создавал впечатление, что он здесь сидит крепко. В глубине обороны противник мог расставить макеты, иметь дежурные средства, маневрируя которыми по траншеям мог создать впечатление, что непосредственные позиции, прилегающие к переднему краю на глубину 2-3 км, живут и не только живут, но и стреляют. Главные же силы он мог держать в 5-6 км от переднего края. Потеряв, наконец, от нашего первого удара 5-6 км территории и заставив нас расстрелять артзапасы, он достиг бы срыва нашей операции. Вы знаете, что для подвоза снарядов для артиллерийской подготовки по условиям коммуникаций требовался один месяц времени. Следовательно, попадаться на удочку противника было нельзя, к тому же мы знали примеры, когда в таком положении оказывались некоторые фронты, не выполнившие задачи прорыва. Было решено не рисковать полной артподготовкой, к тому же за период артподготовки, как правило, расходуются большая часть артиллерийских запасов. После тщательного и всестороннего изучения обороны противника я лично сам изучал эту оборону в течение 1,5 месяца, решили генеральную атаку сразу не вести, так как не было полной гарантии, что данные, полученные от всех видов разведки за вчерашний день, не могут измениться к началу атаки. Противник мог в ночь перед атакой отвести свои войска и оставить на съедение нам только то, что он «ассигнует» для этой цели, т. е. те средства, о которых я уже говорил выше.

Поэтому после тщательного изучения этих вопросов и обсуждения их с командующими, начальниками родов войск, командирами соединений и со штабными офицерами мы пришли к выводу: лучше пойти на обман во время самой

атаки, а для этого должна быть проведена ложная атака, но такая ложная атака, которую противник не распознал бы, что она ложная. Значит, сила артурдара, сила атаки не должны вызвать какое-либо подозрение у противника, и если окажется, что противник будет захвачен врасплох, дрогнет и не выдержит этого удара, мы используем этот успех, немедленно перейдем в атаку всеми силами и будем осуществлять свой генеральный план, т. е. будем вести генеральную атаку. Допустим, что противник пошел все же на обман и очистил бы территорию на 3-5 км, дал возможность нашему первому эшелону атаки приблизиться к истинному переднему краю, а там бы его остановил и атака бы захлебнулась. В этом случае максимум через 1-1,5 часа после передачи соответствующих команд и распоряжений мы могли перейти к плану осуществления артподготовки генеральной атаки. Артсредства с основных позиции, не делая никаких перемещений, потому что артиллерия настолько близко была поставлена к переднему краю (дивизионная артиллерия располагалась в 700-1000 метров от переднего края), могли выполнить задачи артподготовки» [309].

Таким образом, результаты моделирования не противоречат положениям военной науки об исключении шаблона при подготовке и ведении боевых действий.

Перспективными направлениями развития модели «наступление-оборона» тактического уровня являются, во-первых, решение теоретико-игровых задач на оперативном и стратегическом уровнях (при значении параметра масштаба  $m > 1$ ), во-вторых, решение неантагонистических задач, когда стороны руководствуются несовпадающими критериями, в-третьих, решение задач маскировки и введения противника в заблуждение.

Применительно к решению ближайшей задачи можно сформулировать девять математических задач (табл. 4.3.2).

Таблица 4.3.2. Теоретико-игровые задачи боя (решение ближайшей задачи)

| Критерии обороняющейся стороны       | Критерии наступающей стороны     |                                      |                                      |
|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
|                                      | Прорыв слабейшего пункта обороны | Прорыв хотя бы одного пункта обороны | Средневзвешенная вероятность прорыва |
| Прорыв слабейшего пункта обороны     | +                                | —                                    | —                                    |
| Прорыв хотя бы одного пункта обороны | —                                | +                                    | —                                    |
| Средневзвешенная вероятность прорыва | —                                | —                                    | +                                    |

+

— антагонистические игры (решены)

— неантагонистические игры (перспективные задачи)

Из 9-ти задач решены только три. При решении последующей задачи можно использовать два критерия, тогда общее количество задач увеличивается до 18-ти. Еще 18 задач возникают при моделировании боевых действий на оперативном и стратегическом уровнях.

#### 4.3.5. Стратегическая и информационная рефлексия

**Рефлексия.** Одним из фундаментальных свойств бытия человека является то, что наряду с природной («объективной») реальностью существует ее отражение в сознании. При этом между природной реальностью и ее образом в сознании (будем считать этот образ частью особой – рефлексивной реальности) существует неизбежный зазор, несовпадение. Целенаправленное изучение этого феномена традиционно связано с термином «рефлексия», которому «Философский энциклопедический словарь» дает следующее определение: «*рефлексия* (лат. reflexio – обращение назад). Термин, означающий отражение, а также исследование познавательного акта» [355].

Способность осуществлять *авторефлексию* – анализировать собственную деятельность, ее принципы и эффективность – отличает человека от многих высших животных. Способность к рефлексии – «посмотреть на себя стороны», поставить себя на место другого – существенно повышает эффективность прогнозирования человеком поведения других и, следовательно, эффективность принимаемых им решений.

В военном деле с древних времен отличительной способностью талантливого полководца считалась способность «мыслить за противника»: что противник думает о текущей обстановке, какие решения он собирается принять и т. д. Более того, иногда критично и то, что полководец думает о представлениях противника о себе: каких моих действий ожидает противник, что он думает о том, как представляю его планы и т. д. Число «отражений», называемых *рангом рефлексии*, можно наращивать и дальше. Иногда это оправданно, иногда не имеет смысла – см. пример ниже.

С точки зрения теории игр и рефлексивных моделей принятия решений целесообразно разделять стратегическую и информационную рефлексию [260].

*Информационная рефлексия* – процесс и результат размышлений субъекта о том, каковы значения неопределенных параметров, что об этих значениях знают и думают его оппоненты (другие субъекты).

*Стратегическая рефлексия* – процесс и результат размышлений субъекта о том, какие принципы принятия решений используют его оппоненты (дру-

гие субъекты) в рамках той информированности, которую он им приписывает в результате информационной рефлексии.

Таким образом, информационная рефлексия обычно связана с недостаточной взаимной информированностью, и ее результат используется при принятии решений (в том числе при стратегической рефлексии). Стратегическая рефлексия имеет место даже в случае полной информированности, предваряя принятие агентом решения о выбранном действии. Другими словами, информационная и стратегическая рефлексии могут существовать и изучаться независимо, однако в условиях неполной и недостаточной информированности обе они имеют место.

**Стратегическая рефлексия.** Если предположить, что субъект, моделируя поведение оппонентов, приписывает им и себе определенные ранги рефлексии, то исходная игра превращается в новую игру, в которой стратегией агента является выбор ранга рефлексии. Приведем два примера.

Первый пример – *«задача о скоординированной атаке»* (Coordinated Attack Problem). Ситуация выглядит следующим образом. На вершинах двух холмов расположены две дивизии, а в долине расположился противник. Одержат победу можно, только если обе дивизии нападут на противника одновременно. Генерал – командир первой дивизии – посылает генералу – командиру второй дивизии – гонца с сообщением: «Атакуем на рассвете». Так как гонец может быть перехвачен противником, то первому генералу необходимо дождаться от второго генерала сообщения о том, что первое сообщение получено. Но так как второе сообщение также может быть перехвачено противником, то второму генералу необходимо получить от первого подтверждение, что тот получил подтверждение. И так далее до бесконечности. Задача заключается в том, чтобы определить, после какого числа сообщений (подтверждений) генералам имеет смысл атаковать противника. Вывод следующий – в описанных условиях скоординированная атака невозможна, а выходом является использование вероятностных принципов принятия решений [260].

Второй пример – *«задача о выборе направления главного удара»*. Пусть имеются две воюющие стороны. У первого игрока – нападающего – имеются две альтернативы – атаковать на левом фланге («Л»), или на правом («П»). У второго игрока – обороняющегося, соответственно те же две альтернативы – разместить резервы на левом или на правом фланге. Обе стороны принимают решение однократно, одновременно и независимо друг от друга (то есть, не зная решения противника). Следовательно, между ними имеет место *биматричная игра*.

Предположим, что если нападающий атакует на фланге, на котором

размещены резервы, то его наступление неудачно и он несет большие потери (выигрывает обороняющийся). Если же он атакует необеспеченный резервами фланг, то наступление успешно и происходит прорыв обороны (выигрывает нападающий). То есть биматрицу выигрышей (первое число – выигрыш нападающего, второе – обороняющегося) можно представить, например, в следующем виде:

|            |   |               |           |
|------------|---|---------------|-----------|
| Нападающий |   | Обороняющийся |           |
|            |   | Л             | П         |
|            | Л | (-5; 5)       | (10; -10) |
|            | П | (15; -15)     | (-10; 10) |

В данной игре не существует равновесия Нэша в чистых стратегиях [124], а равновесие в смешанных стратегиях имеет вид:  $p^* = (5/8; 3/8)$ ,  $q^* = (1/2; 1/2)$ , то есть атакующему следует с большей вероятностью атаковать на левом фланге, а обороняющемуся – распределять резервы между флангами с равными вероятностями. Математические ожидания выигрышей при этом равны  $5/2$  для нападающего и  $-5/2$  для обороняющегося.

Рассмотрим *игру рангов* [260]. Поясним, что понимается под рангом рефлексии (точнее – под рангом стратегической рефлексии) в биматричных играх. В них выбор действий игроком может осуществляться на основании знания рангов рефлексии оппонента. Ранги стратегической рефлексии определяются следующим образом: игрок имеет нулевой ранг рефлексии, если он знает только матрицу платежей; игрок обладает первым рангом рефлексии, если он считает, что его противники имеют нулевой ранг рефлексии, то есть знают только матрицу платежей; вообще, агент с  $k$ -ым рангом рефлексии предполагает, что его противники имеют  $k-1$ -й ранг рефлексии (он проводит за них необходимые рассуждения по выбору стратегии и выбирает свою стратегию на основе знания матрицы платежей и экстраполяции действий своих противников).

Основной задачей, решаемой при исследовании стратегической рефлексии, является определение *максимального целесообразного ранга рефлексии* – того ранга, который следует иметь игроку для того, чтобы охватить все многообразие исходов игры (упуская из виду некоторые стратегии оппонента, агент рискует уменьшить свой выигрыш).

В рассматриваемом примере из свойств биматрицы выигрышей следует, что гарантирующая стратегия нападающего – атаковать на левом фланге, а обороняющегося – размещать резервы на правом фланге. Их выигрыши в гарантирующем равновесии (Л; П) равны (10; -10).

Выигрыши в игре рангов имеют вид:

|            | Ранг рефлексии: стратегия | Обороняющийся    |           |           |           |
|------------|---------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|
|            |                           | 0 : П            | 1 : Л     | 2 : Л     | 3 : П     |
| Нападающий | 0 : Л                     | <b>(10; -10)</b> | (-5; 5)   | (-5; 5)   | (10; -10) |
|            | 1 : Л                     | (10; -10)        | (-5; 5)   | (-5; 5)   | (10; -10) |
|            | 2 : П                     | (-10; 10)        | (15; -15) | (15; -15) | (-10; 10) |
|            | 3 : П                     | (-10; 10)        | (15; -15) | (15; -15) | (-10; 10) |

Поясним, как заполняются подобные матрицы. Гарантирующее равновесие выделено жирным шрифтом. Если обороняющийся имеет первый ранг стратегической рефлексии, то он считает, что нападающий будет использовать свою гарантирующую стратегию – атаковать на левом фланге. Наилучшим ответом обороняющегося на такие ожидаемые действия нападающего будет разместить резервы на том же (левом) фланге. Паре стратегий (Л; Л) в исходной биматрице соответствуют выигрыши (-5; 5).

Если обороняющийся имеет второй ранг рефлексии, то он считает, что нападающий имеет первый ранг (то есть будет атаковать на левом фланге). Наилучшим ответом обороняющегося на атаку на левом фланге является размещение резервов на этом же (левом) фланге.

Если обороняющийся имеет третий ранг рефлексии, то он считает, что нападающий имеет второй ранг (то есть будет атаковать на правом фланге). Наилучшим ответом обороняющегося на атаку на правом фланге является размещение резервов на этом же (правом) фланге. Паре стратегий (Л; П) в исходной биматрице соответствуют выигрыши (10; -10). И т. д. для других строк и столбцов биматрицы игры рангов.

Спрашивается, всегда ли полководцу выгодно иметь максимально возможный ранг рефлексии? Ответ на этот вопрос отрицательный.

Во-первых, взглянув на биматрицу выигрышей в игре рангов, можно заметить, что столбец, соответствующий второму рангу рефлексии обороняющегося совпадает со столбцом, соответствующим его первому рангу, а третий – с нулевым. Следовательно, четвертый ранг приведет к тем же результатам, что и первый, пятый – что и второй и т. д. Такая «периодичность» столбцов говорит о том, что для обороняющегося все затененные столбцы, начиная со второго ранга рефлексии, являются «лишними».

Аналогично у нападающего – начиная с третьего ранга стратегической рефлексии строки начинают повторяться.

То есть, во-первых, можно видеть, что на втором ранге рефлексии исчерпывается все множество допустимых действий, а после третьего ранга рефлексии стратегии начинают повторяться. Этот факт являлся иллюстрацией того, что в конечной игре двух лиц увеличение рангов рефлексии выше определенного объективно не дает ничего нового, хотя субъективное нарастание сложности может продолжаться. Корректное исследование этого свойства проведено в [260].

Во-вторых, отметим, что определение ранга стратегической рефлексии противоречиво в том смысле, что для двух игроков не существует пары рангов, являющихся согласованными представлениями игроков друг о друге. Более того, переоценка способностей противника может оказаться вредна. Предположим, что объективно нападающий имеет первый ранг рефлексии (и, следовательно, атакует на левом фланге). Если бы обороняющийся правильно оценил его ранг рефлексии (сам имел бы второй ранг), то выигрыш обороняющегося при паре стратегий (Л; Л) составил бы 5 единиц. Если же обороняющийся ошибочно считает, что нападающий имеет второй ранг, то его выигрыш при паре стратегий (Л; П) будет  $-10$  единиц.

Рассмотренный пример является очень упрощенной версией игры полковника Блотто (описанной также в разделе 4.3.1), рефлексивный вариант которой исследован в [177].

Таким образом, невозможно однозначно утверждать, что более высокий ранг стратегической рефлексии лучше более низкого. Предпочтительность того или иного ранга определяется его взаимодействием с рангом рефлексии противника: переоценить противника иногда хуже, чем недооценить (см. пример выше и примеры в [260]).

**Информационная рефлексия.** Если у одной из сторон имеется возможность сформировать ту или иную структуру информированности, то имеем дело с задачей *информационного управления* (см. [260]) – целенаправленного формирования представлений, выгодных управляющему субъекту. Ниже рассмотрим примеры рефлексивных игр и задач информационного управления в модели «наступление – оборона» на тактическом уровне при различных неопределенных параметрах.

Рассмотрим *пример* рефлексивной игры прорыва пунктов обороны на тактическом уровне с критерием прорыва хотя бы одного пункта (см. выражение (4.3.21), в которой неопределенным параметром является суммарное количество средств нападающей стороны. Пусть сторона обороны – игрок О – считает, что этот параметр принимает значение  $\rho_x$ , в то время как истинным значением является  $r_x$ , и все это известно стороне нападения – игроку Н. Такая структура информированности может быть представлена в виде графа с тремя вершинами (см. рис. 4.3.3), на котором через ОН обозначен игрок Н с точки

зрения игрока О, а стрелки обозначают адекватную информированность игроков друг о друге. Игрок ОН является *фантомным*, т. е. он существует лишь в сознании игрока О и не совпадает с реальным игроком Н (игрок ОН считает значением неопределенного параметра  $\rho_x$ ).

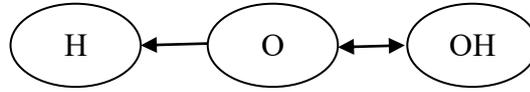


Рис. 4.3.3. Граф рефлексивной игры при информированной стороне нападения

Итак, субъективно игрок О играет в антагонистическую игру с целевой функцией

$$G(x, y) = 1 - \prod_{i=1}^n \left( \frac{y_i}{\beta_i x_i + y_i} \right), \quad \sum_{i=1}^n x_i = \rho_x, \quad \sum_{i=1}^n y_i = r_y$$

и собственной стратегией  $y = (y_1, \dots, y_n)$ . Как было показано выше (см. выражения (4.3.22) – (4.3.24)), оптимальная стратегия игрока О в этой игре имеет следующий вид:

$$y_i^0(\rho_x) = \frac{\beta_i r_y}{\tilde{S}(\beta_i \rho_x + r_y)}, \quad i = 1, \dots, n, \quad \tilde{S} = \sum_{k=1}^n \frac{\beta_k}{\beta_k \rho_x + r_y}. \quad (4.3.34)$$

Игрок Н использует критерий, задаваемый целевой функцией

$$G(x, y) = 1 - \prod_{i=1}^n \left( \frac{y_i}{\beta_i x_i + y_i} \right), \quad \sum_{i=1}^n x_i = r_x, \quad \sum_{i=1}^n y_i = r_y. \quad (4.3.35)$$

Решение игры представлено в [179]. На рис. 4.3.4 показан график зависимости вероятности прорыва пунктов при значениях  $r_x = 200$ ,  $\rho_x$  от 20 до 2000 и для двух условий обороны (значений вектора  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ ).

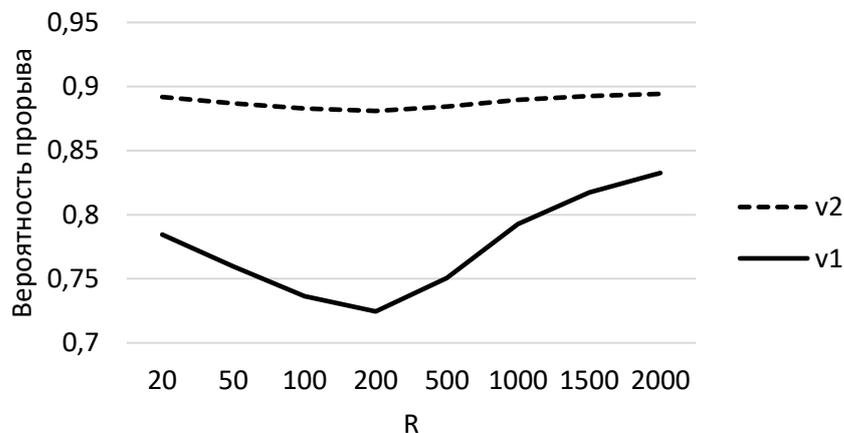


Рис. 4.3.4. График вероятности прорыва пунктов обороны в зависимости от представлений обороняющихся о численности наступающих: v1 при  $\beta_1 = 1, \beta_2 = \beta_3 = 0,05$ ; v2 при  $\beta_1 = 1, \beta_2 = 0,5, \beta_3 = 0,2$

Из рисунка видно, что формировать у противника (обороняющихся) представления об иной численности боевых единиц своей стороны целесообразно, когда возможности по прорыву пунктов обороны (значения вектора  $\beta$ ) существенно различны.

Рассмотрим *пример* рефлексивной игры прорыва пунктов обороны на тактическом уровне в задаче, в которой выбором игроков является распределение ресурсов между двумя направлениями их использования – прорыв обороны и захват объекта в глубине обороны (см. раздел 4.3.4). Неопределенным параметром является суммарное количество средств обороняющейся стороны. Пусть сторона нападения – игрок Н – считает, что этот параметр принимает значение  $\rho_y$ , в то время как истинным значением является  $R_y$ , и все это известно стороне обороны – игроку О. Такая структура информированности может быть представлена в виде графа с тремя вершинами (см. рис. 4.3.5), на котором через НО обозначен игрок О с точки зрения игрока Н, а стрелки обозначают адекватную информированность игроков друг о друге.

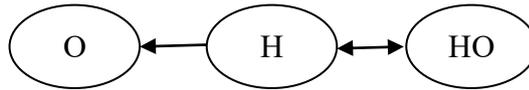


Рис. 4.3.5. Граф рефлексивной игры при информированной стороне обороны

Итак, субъективно игрок Н играет в антагонистическую игру с целевой функцией

$$F(u, w) = \frac{B(R_x - u)}{B(R_x - u) + (\rho_y - w)} \times \frac{\delta u}{\delta u + w}, \quad B = \sum_{j=1}^n \beta_j,$$

и собственной стратегией  $u$ . Известно (см. (4.3.30)), что оптимальная стратегия игрока Н в этой игре имеет следующий вид:

$$u^0(\rho_y) = R_x \tilde{D}, \quad \tilde{D} = \frac{\rho_y + BR_x}{2\rho_y + (B + \delta)R_x}. \quad (4.3.36)$$

Игрок О, информированный об этом, решает задачу минимизации целевой функции

$$F(u^0, w) = \frac{B(R_x - u^0)}{B(R_x - u^0) + (\rho_y - w)} \times \frac{\delta u^0}{\delta u^0 + w}, \quad B = \sum_{j=1}^n \beta_j, \quad (4.3.37)$$

путем выбора своей стратегии  $w$ . Нетрудно убедиться, что оптимальная стратегия игрока О, минимизирующая функцию (4.3.37), имеет следующий вид:

$$w^0 = \frac{BR_x + R_y - (B + \delta)R_x \tilde{D}}{2}. \quad (4.3.38)$$

Предположим теперь, что игрок О имеет возможность сформировать у игрока Н любое представление о значении неопределенного параметра в пределах множества  $R$ . Тогда ответом на вопрос о том, какое именно представление ему выгодно сформировать, является решение следующей оптимизационной задачи:

$$F(u^0(\rho_y), w^0) \xrightarrow{\rho_y \in R} \min.$$

Исходя из соотношений (4.3.36) – (4.3.38), эту задачу можно записать, после простых преобразований, следующим образом:

$$\psi(\rho_y) = \frac{4B\delta(1 - \tilde{D}(\rho_y))\tilde{D}(\rho_y)}{[B + R_y / R_x + (\delta - B)\tilde{D}(\rho_y)]^2} \xrightarrow{\rho_y \in R} \min. \quad (4.3.39)$$

Доказано [179]: если множество  $R$  представляет собой отрезок, то минимум функции (4.3.39) достигается на одной из границ отрезка.

Пусть  $n = 3$ ,  $R_x = 400$ ,  $R_y = 300$ ,  $B = 10$ ,  $\delta = 1$ ,  $R = [30, 3000]$ . Подставляя  $R_y$  и граничные значения отрезка  $R$  в формулу (4.3.39), получаем:

$$\psi(300) \approx 0,53, \quad \psi(30) \approx 0,51, \quad \psi(3000) \approx 0,40.$$

Тогда оптимальным информационным управлением со стороны игрока О является  $\rho_y = 3000$ , и оно позволяет уменьшить вероятность захвата объекта в глубине обороны (вероятность решения ближайшей и последующей задач) на 0,13.

**Рефлексия и маскировка.** Рассмотрим подходы к моделированию маскировки. *Маскировка* (от франц. masquer – делать незаметным, невидимым для кого-либо), комплекс мероприятий, направленных на скрытие от противника войск (сил) и объектов и введение его в заблуждение относительно наличия, расположения, состава, состояния, действий и намерений войск (сил), а также планов командования; вид боевого (оперативного) обеспечения. Маскировка способствует достижению внезапности действий войск (сил), сохранению их боеспособности и повышению живучести<sup>1</sup>.

По предмету маскировки можно выделить следующие задачи моделирования:

- воздействия на моральное состояние своих войск и войск противника;
- скрытие численности своих сил и средств, объектов или показ несуществующих (имитация и демонстративные действия);
- воздействия, направленные на изменение значений параметров технологического превосходства на объектах обороны;

<sup>1</sup> Маскировка. – URL: <https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=7917@morfDictionary> (дата обращения – 15.03.2024).

– введение противника в заблуждение относительно намерений командования (каким критерием при распределении единиц по объектам обороны стороны руководствуются).

Для моделирования маскировки представляется обоснованным использовать рефлексивные игры (см. [260]). В терминах рефлексивных игр с двумя игроками результатом маскировки является наличие у противника искаженных представлений о важных параметрах ситуации (информационная рефлексия) или о принципах принятия решений оппонентом (стратегическая рефлексия).

Рассмотрим *формальную модель*. Пусть целевые функции двух сторон конфликта  $f(\theta, x, y)$  и  $g(\theta, x, y)$  (наступающих и обороняющихся соответственно) зависят от стратегий сторон  $x \in X$  и  $y \in Y$ , а также значения характеризующего ситуацию параметра  $\theta$  (в типичных случаях множества  $X$  и  $Y$  являются векторами). Тогда результатом успешной маскировки является появление у другой стороны конфликта искаженного представления  $\tilde{\theta}$ , не совпадающего с реальным, т. е.  $\tilde{\theta} \neq \theta$ .

Для определенности предположим, что операции по маскировке проводит сторона наступления. Если маскировка была успешной, то сторона обороны субъективно играет в игру с целевыми функциями  $f(\tilde{\theta}, x, y)$  и  $g(\tilde{\theta}, x, y)$ . Рассмотрим случай, когда эта игра имеет единственное решение (пару равновесных стратегий), которое обозначим через  $(x^*(\tilde{\theta}), y^*(\tilde{\theta}))$ . Тогда сторона наступления, проводя операции по маскировке, может рассчитывать на следующее значение своей целевой функции:

$$\max_{x \in X} f(\theta, x, y^*(\tilde{\theta})).$$

Обозначим через  $\Theta$  множество всех значений параметра  $\tilde{\theta}$ , которые могут быть реализованы как результат маскировочных операций. Тогда для принятия решения о выборе оптимальных операций по маскировке требуется решить следующую задачу оптимизации:

$$\max_{x \in X} f(\theta, x, y^*(\tilde{\theta})) \rightarrow \max_{\tilde{\theta} \in \Theta}.$$

Примеры решения задач маскировки см. в [179; 260].

Таким образом, рассмотренная модель «наступление-оборона», во-первых, является расширением классических задач (игра полковника Блотто, задача «нападение-защита» Ю.Б. Гермейера), во-вторых, соответствует положениям военной науки о ведении боевых действий, в-третьих, позволяет обосновать основные элементы замысла командира (командующего) на бой (сражение, операцию).

#### 4.3.6. От замысла к решению на боевые действия

Решение на операцию (бой) – это определенные командующим (командиром) порядок и способы выполнения боевой задачи. Включает замысел операции (боя); задачи элементам оперативного построения (боевого порядка) – войскам (силам); основы взаимодействия, всестороннего обеспечения и управления. Решение является основой управления войсками (силами). Оно принимается на основе уяснения полученной задачи, оценки обстановки и проведения расчетов (моделирования операции). Данные для принятия решения подготавливаются штабом, начальниками родов войск, специальных войск и служб<sup>1</sup>.

По опыту Великой Отечественной войны основными мероприятиями по организации боевых действий являлись: проведение разведки местности и противника; принятие решения и организация взаимодействия с общевойсковыми соединениями, артиллерией и авиацией; постановка подчиненным боевых задач и организация взаимодействия на местности и макете местности во всех звеньях, вплоть до экипажей; организация всестороннего обеспечения боя. При планировании наступления особое внимание уделялось массированию сил и средств на главном направлении, которое оценивалось плотностью сил и средств (количество батальонов, орудий и минометов, танков и САУ на км участка прорыва). Хорошая организация взаимодействия в ряде операций достигалась многократной отработкой вопросов на тактических учениях с войсками на местности, а также при проведении командирских и штабных занятий на картах, ящиках с песком или полигонах [331].

В настоящее время, при наличии в войсках автоматизированных систем, появляется возможность непрерывно проводить расчеты, учитывая значимые изменения обстановки (появление новых сведений о противнике, степени оборудования местности и т. д.) и при необходимости уточнять решение.

На рис. 4.3.6 показана динамика принятия (уточнения) решения и моделирование на этапе подготовки боевых действий.

Решение принимается (включая его утверждение старшим начальником, отдачу директив, приказов и боевых распоряжений) на основании расчетов и с учетом сведений об обстановке на некоторый момент времени  $T_0$ . Пусть заданы: требуемая вероятность  $P_0$  победы в боевых действиях; время  $T_A$  начала

---

<sup>1</sup> Решение на операцию (бой). – URL: <https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=12306@morfDictionary> (дата обращения – 03.04.2024).

действий и время  $T_P$ , необходимое силам на подготовку к действиям (с момента  $T_0$ ).

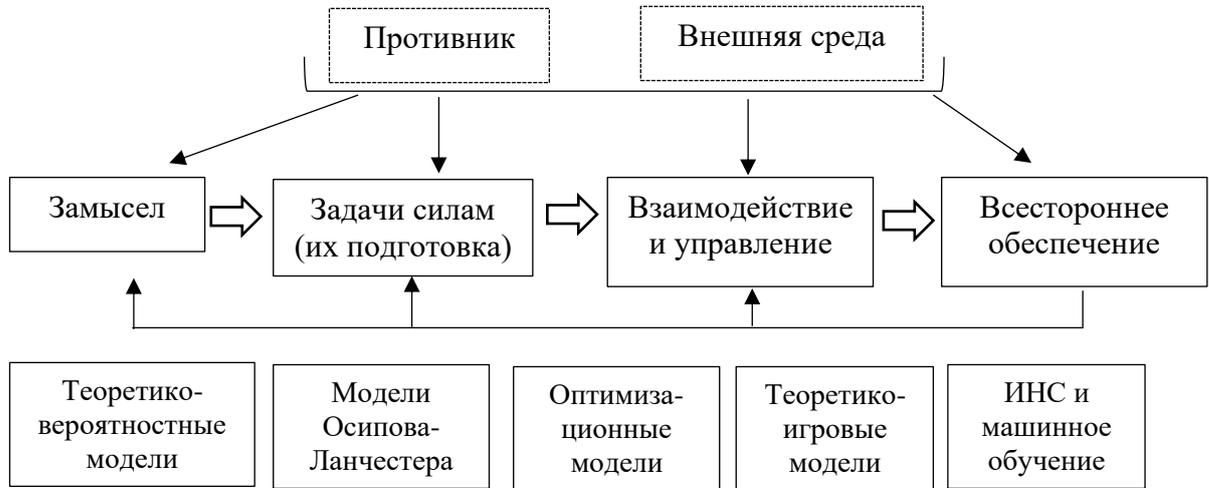


Рис. 4.3.6. Динамика принятия решения и моделирование на этапе подготовки боевых действий

В случае изменения обстановки (получения указания от старшего начальника или по графику) в момент времени  $T_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) выполняются расчеты (оценки):

- вероятность  $P_i$  победы в боевых действиях;
- время  $t_i$ , необходимое для уточнения обстановки и ввода данных в АСУВ;
- время  $\tau_i$ , необходимое для выполнения расчетов, подготовки и отдачи распоряжений, организации взаимодействия и управления;
- время  $T_{P_i}$ , необходимое на подготовку к действиям (с учетом ранее выполненных мероприятий);
- время  $s_i$ , необходимое для всестороннего обеспечения действий (с учетом ранее выполненных мероприятий).

Проверяются условия:

$$T_i + t_i + \tau_i + \max(T_{P_i}, s_i) \leq T_A,$$

$$P_i \geq P_0.$$

Если условия выполняются, то при необходимости принимаются частные решения и идет подготовка к боевым действиям. В случае нарушения хотя бы одного из условий необходимо обратиться к старшему начальнику для уточнения задачи и/или времени начала действий.

#### 4.4. Имитационные модели боя подразделений (групп)

Рассуждая об итогах Варшавско-Лодзинско-Познаньской операции 1-го Белорусского фронта, Г.К. Жуков отмечал: «Танковые армии вводились в прорыв по плану на третий день операции, при этом учитывалось, что мы должны обеспечить их ввод с наименьшими потерями, т. е. обработать полосу ввода в прорыв наиболее чисто. ... Разрыв в действии общевойсковых армий и танковых армий – два дня. Что же здесь неправильного в планировании? Фронт не мог заранее сказать, что танковые армии войдут в прорыв не на третий день, а, скажем, на второй или первый и что они пойдут с расчетом не 20-30 км в сутки, а 100 км. ... Оказалось, нервы противника, его физические и моральные силы не выдержали удара. Он быстрее поддался нашему удару, чем мы предполагали. При этих условиях мы не могли придерживаться плана, яко слепой стены. Раз создалась обстановка, мы потребовали от 2-й танковой армии в первый же день выйти в район Жирардув, Сохачев, т. е. сделать бросок на 70-80 км. Этим маневром мы сразу поставили в тяжелое положение всю варшавскую группировку противника. Она начала бежать, как только почувствовала на своих тылах массовое количество танков. Танкисты это прекрасно понимали, ... они знали и то, что план – это только ориентировка, а действия, если этому способствуют благоприятные условия, должны развиваться по здравому смыслу в порядке управления. К этому войска были подготовлены» [309].

Один из способов подготовки командиров к ведению боевых действий – это проведение командно-штабных учений и тренировок по ведению боевых действий с использованием имитационных моделей.

##### 4.4.1. Имитационное моделирование и коллективное поведение

*Имитационное моделирование* – это разработка компьютерных моделей и постановка экспериментов на них. В англоязычной литературе для обозначения процесса моделирования используются два различных слова: *modeling* и *simulation*. При этом первому слову соответствует процесс проектирования, создания модели устройства или предметной области. Под имитацией (*simulate*) понимают исследование (испытание, численную прогонку) модели [16, с. 33].

С точки зрения анализа и управления боевыми действиями значительный интерес представляет разработка моделей коллективного поведения и их исследование с помощью компьютерных реализаций<sup>1</sup>.

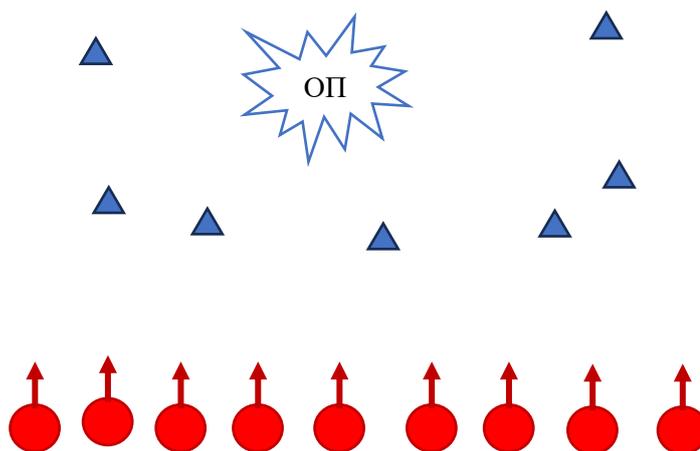
<sup>1</sup> К отдельному классу можно отнести задачи оценки боевой эффективности оружия (Weapon Combat Effectiveness – WCE), выполняемые с использованием имитационных моделей (см. [491]).

В рассмотренных ранее теоретико-игровых моделях считалось, что вся существенная информация и принципы принятия субъектами решений всем им известны (так называемая концепция общего знания). В отличие от теории игр, *теория коллективного (группового) поведения* занимается исследованием динамики поведения рациональных субъектов при достаточно слабых предположениях относительно их информированности. Более того, зачастую субъекты, принимая решения, могут «не знать о существовании» некоторых других субъектов или иметь о них агрегированную информацию [254, с. 3].

Далее рассмотрим две задачи коллективного поведения в конфликтной среде, т. е. в условиях *противодействия* (обнаружения, информационного противодействия, уничтожения) [176; 180; 294].

#### **4.4.2. Имитационная модель поражения неподвижного объекта (задача о диффузной бомбе)**

Пусть имеется неподвижный или малоподвижный объект (опорный пункт – ОП, авианосец и т. д.) и группа боевых единиц (боевая группа – БГ). Цель БГ, состоящей из нескольких боевых единиц, движущихся на плоскости, заключается в поиске (поражении) ОП; время действий не фиксировано; ОП имеет несколько неподвижных сенсоров; единицы БГ движутся с постоянной по абсолютной величине заданной скоростью (направление движения может меняться); планирование ими траекторий осуществляется децентрализованно (автономно) в реальном времени (рис. 4.4.1)<sup>1</sup>.



Звездочка – ОП, треугольники – сенсоры, круги со стрелками – боевые единицы

*Рис. 4.4.1. Задача поражения ОП группой боевых единиц*

<sup>1</sup> В [176; 178], где эта модель впервые была рассмотрена, она получила название «задача о диффузной бомбе».

*Информированность* БГ (та информация о параметрах системы обороны и других боевых единиц, которой они обладают на момент планирования траекторий) детализируется далее, как и вид функционала риска обнаружения. Критерием эффективности действий БГ будем считать их число  $K$ , достигших ОП.

**Планирование траекторий в условиях противодействия.** Рассмотрим следующую задачу. Заданы начальные положения  $(x_j(0), y_j(0))$ ,  $j = 1, \dots, K_0$ , на плоскости  $K_0$  подвижных боевых единиц, входящих в состав БГ. Их цель – оказаться в точке с координатами ОП  $(x^*, y^*)$ . Положение  $j$ -й единицы в момент времени  $t \geq 0$  обозначим через  $(x_j(t), y_j(t))$ , ее скорость – через  $v_j(t) = \sqrt{(\dot{x}_j)^2 + (\dot{y}_j)^2}$ , время первого попадания в точку  $(x^*, y^*)$  – через  $T_j$ .

Имеется  $N$  неподвижных сенсоров с координатами  $(a_i, b_i)$ ,  $i = 1, \dots, N$ , имеющих возможность суммировать приходящие на них в один и тот же момент времени сигналы. Расстояние от  $j$ -й боевой единицы до  $i$ -го сенсора обозначим через  $\rho_{ij}(t) = \sqrt{(x_j(t) - a_i)^2 + (y_j(t) - b_i)^2}$ .

В общем случае риск обнаружения  $j$ -й единицы системой сенсоров описывается следующим функционалом (ср. с (5.4.1)):

$$R_j = \int_0^{T_j} \sum_{i=1}^N \frac{(v_j(t))^m}{(\rho_{ij}(t))^k} dt, \quad (4.4.1)$$

где «сигнал» на сенсоре (слагаемое в выражении (4.4.1)) зависит от скорости боевой единицы и ее расстояния до сенсора. Из вида функционала (4.4.1) следует, что риск обнаружения единиц зависит от значений «сигналов» на различных сенсорах. Показатель степени  $k$  характеризует физическое поле, в котором осуществляется обнаружение, а показатель степени  $m$  – зависимость уровня интенсивности излучаемого сигнала от скорости движения единицы. Значения  $k$  соответствуют:

$k = 1$  – первичному гидроакустическому полю в мелком море;

$k = 2$  – тепловому полю, первичному электромагнитному полю и первичному гидроакустическому полю в глубоком море;

$k = 3$  – магнитному полю;

$k = 4$  – вторичному (при активном режиме обнаружения) электромагнитному и гидроакустическому полям.

Результаты исследования свойств оптимальных траекторий позволяют сформулировать эвристику, использующую идею о том, что плоскость может быть разбита на  $N$  областей (каждая соответствует своему сенсору), а опти-

мальные траектории должны проходить по границам этих областей. Другим примером может служить разбиение плоскости на многогранники Вороного (движение боевых единиц по различным граням этого многоугольника). Альтернативой служит сеточное разбиение плоскости, что позволяет свести задачу к дискретной задаче поиска «кратчайшего» пути (где длина определяется вероятностью обнаружения единицы и/или длиной траектории, и/или энергетическими и временными критериями).

Далее рассмотрим результаты имитационного моделирования взаимодействий боевых единиц при решении задачи уничтожения опорного пункта.

**«Некооперативная» модель.** Пусть все единицы движутся с постоянной по величине скоростью  $v_0$ . Зная расположение сенсоров и их условные неотрицательные чувствительности  $\{c_i\}$ ,  $i = 1, \dots, N$ , можем по аналогии с выражением (4.4.1) для каждой точки  $(x, y)$  плоскости определить риск (вероятность обнаружения)

$$r(x, y) = \min \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{\left( \sqrt{(x-a_i)^2 + (y-b_i)^2} \right)^k}; 1 \right\} \quad (4.4.2)$$

обнаружения отдельной единицы, находящейся в этой точке.

Пусть время дискретно. Шаг времени обозначим через  $\tau$ , через  $p$  обозначим вероятность уничтожения обнаруженной единицы (для простоты будем считать, что эта вероятность не зависит от координат точки обнаружения, времени и скорости этой единицы – учет в будущих исследованиях этих зависимостей представляется перспективным), через

$$\mathbf{e}(x, y) = \frac{(x^* - x, y^* - y)}{\sqrt{(x^* - x)^2 + (y^* - y)^2}}$$

– единичный вектор направления на ОП в точке  $(x, y)$ , через  $\rho((x, y); (q, w))$  – евклидово расстояние между точками  $(x, y)$  и  $(q, w)$ , через  $s_\Delta(x, y)$  – круг радиуса  $\Delta \geq 0$  с центром в точке  $(x, y)$ .

Рассмотрим несколько стратегий поведения боевых единиц.

**Вариант I.** Первый и самый простой вариант, когда каждая единица движется по прямой, соединяющей ее начальное положение с ОП. Такие единицы назовем *неинтеллектуальными*. В рамках варианта I каждая единица в каждый момент времени должна знать только свое текущее положение и положение ОП.

Более «интеллектуальные» единицы должны учитывать текущие и/или

будущие вероятности их обнаружения. Для описания их поведения определим множество таких точек, что: 1) в них единица может оказаться, начав двигаться из точки  $(x, y)$  со скоростью  $v_0$ , через время  $\tau$ , 2) вероятность обнаружения единицы не превышает пороговой величины  $\delta$ ; 3) плюс сама точка  $(x, y)$ :

$$S_{v_0\tau}^\delta(x, y) = \{(q, w) \mid \rho((x, y); (q, w)) = v_0\tau; r(q, w) \leq \delta\} \cup \{(x, y)\}. \quad (4.4.3)$$

Линию уровня суммарного сигнала  $r(x, y) = \delta$  будем называть *пороговой линией*. Обозначим  $\text{Proj}_{S_{v_0\tau}^\delta(x, y)}(x^*, y^*)$  – проекцию положения единицы на множество  $S_{v_0\tau}^\delta(x, y)$  (т. е. ближайшая в смысле евклидова расстояния до ОП точка этого множества; если такая проекция не единственна, выберем равновероятно любую из них).

**Вариант II.** Введем следующие правила планирования единицами своих траекторий (*алгоритм некооперативного поведения*).

Шаг 1. В каждый период времени единица, находящаяся в точке  $(x, y)$ , с вероятностью  $p$  уничтожается системой обороны, а с вероятностью  $1 - p$  продолжает движение.

Шаг 2. Продолжив движение, единица к началу следующего периода времени окажется в точке  $(u, v)$ , где

$$(u, v) \in \begin{cases} \text{Proj}_{S_{v_0\tau}^\delta(x, y)}(x^*, y^*), & \text{если } (x, y) \notin \text{Proj}_{S_{v_0\tau}^\delta(x, y)}(x^*, y^*) \\ (x, y) + \min\{v_0\tau; \rho((x, y); (x^*, y^*))\} \mathbf{e}(x, y), & \text{иначе.} \end{cases} \quad (4.4.4)$$

Первый случай в выражении (4.4.4) соответствует неудалению от ОП при условии, что риск обнаружения не превысит пороговый. Второй случай – «прорыв» по прямой к ОП (в случае, если не удастся обеспечить выполнение условия непревышения вероятностью обнаружения порогового значения, т. е. когда следование этому условию приводит к удалению от ОП).

В рамках алгоритма некооперативного поведения, боевая единица, находящаяся в некоторой точке, должна иметь оценки риска обнаружения только для  $v_0\tau$ -окрестности этой точки; т. е. поведение единицы локально оптимально, и требует только локальной информации. Отметим, что при активном режиме обнаружения ( $k = 4$ ) эта локальная информация может вычисляться посредством экстраполяции текущих измерений сигналов сенсоров. При пассивном режиме достаточно потребовать знания всеми единицами координат и чувствительностей сенсоров (что дает им возможность рассчитать риск (4.4.2) для произвольной точки плоскости).

Некооперативное поведение группы боевых единиц будет описываться следующим образом: для каждого момента времени для каждой единицы выполнять последовательно шаг 1 и шаг 2 до тех пор, пока либо не будут уничтожены все единицы, либо уцелевшие единицы не достигнут ОП.

**«Кооперативная» модель.** Взаимодействие единиц будем учитывать следующим образом: предположим, что вероятность обнаружения данной единицы зависит не только от текущих расстояний от нее до сенсоров, но и от того, насколько близко к ней расположены другие единицы (пример – рост эффективной поверхности рассеивания). Другими словами, условно можно считать, что единицы служат «сенсорами» друг друга, и по мере их взаимного сближения растет вероятность обнаружения.

Обозначим через

$$R_j(x_j, y_j) = \min \left\{ r(x_j, y_j) + \sum_{l \neq j} \frac{\alpha}{1 + \left( \sqrt{(x_j - x_l)^2 + (y_j - y_l)^2} \right)^k}; 1 \right\} \quad (4.4.5)$$

риск обнаружения  $j$ -й единицы, находящейся в точке  $(x_j, y_j)$ , с учетом ее взаимодействия с другими единицами, где  $\alpha$  – неотрицательная константа.

**Вариант III.** Подвижные объекты прорываются к ОП по прямой, не учитывая и не прогнозируя вероятности их обнаружения. Данный вариант соответствует варианту I с точностью до замены риска (4.4.2) на риск (4.4.5). Информированность единиц при этом такая же, что и в варианте I.

**Вариант IV.** Алгоритм «кооперативного» поведения будет описываться шагами 1' и 2', которые с точностью до замены риска (4.4.2) на риск (4.4.5) совпадают соответственно с шагами 1 и 2, причем в выражении (4.4.5) суммирование ведется по тем единицам, которые к текущему моменту не уничтожены. Вариант IV соответствует варианту II с точностью до замены риска.

В данном случае для планирования своей траектории каждая единица, помимо информации, необходимой во втором варианте, должна знать текущие координаты всех других единиц.

**Рефлексивная модель.** Будем считать, что в группе присутствуют боевые единицы двух типов. Единицы первого типа – назовем их *нерефлексирующими* – действуют в соответствии с алгоритмом «кооперативного» поведения (вариант IV). Единицы второго типа (*рефлексирующие*) действуют более сложным образом: каждая из них, считая всех остальных нерефлексирующими, прогнозирует их поведение. Другими словами, рефлексирующая

единица точно рассчитывает, где окажутся в следующий момент времени другие единицы (действующие в соответствии с вариантом IV) и выбирает направление своего движения с учетом прогнозируемых положений других единиц.

Определим шаги 1'' и 2'' как шаги, которые с точностью до замены риска (4.4.5) на прогнозируемый риск совпадают с шагами 1' и 2'.

**Вариант V.** Алгоритм рефлексивного поведения группы боевых единиц: для каждого момента времени для каждой нерефлексирующей единицы выполнять последовательно шаги 1' и 2', а для каждой рефлексирующей единицы – шаги 1'' и 2'', пока все уцелевшие единицы не достигнут ОП.

**Адаптивная модель.** Специфика интеллектуальных единиц заключается, в частности, в том, что каждая из них в качестве информации для корректировки своих представлений о неопределенных параметрах может использовать не только результаты наблюдения за внешней средой, но и результаты наблюдения за поведением других единиц, пытаюсь «объяснить», почему они выбрали именно наблюдаемые действия. Применительно к рассматриваемой задаче это означает, например, что, даже не имея возможности непосредственно измерять (или не имея априорной информации) о значениях вероятности обнаружения в той или иной точке пространства, адаптивная единица, наблюдая изменения траекторий других единиц, может восстанавливать информацию о пороговой линии.

Пусть имеются единицы двух типов. Положим, что все единицы в каждый момент времени знают свое текущее положение и положение цели. Дополнительно единицы первого типа в каждый момент времени знают оценки риска обнаружения для  $\nu_0 \tau$ -окрестности своего текущего положения, а единицы второго типа в каждый момент времени знают (или могут измерить) текущие координаты всех единиц первого типа.

Единицы первого типа действуют в соответствии с вариантом II, а единицы второго типа на каждом шаге сначала на основании наблюдения за движением других единиц вычисляют оценку расположения пороговой линии. Затем они действуют в соответствии с вариантом II, подставляя в аналог выражения (4.4.3) свою текущую оценку пороговой линии. Другими словами, единицы второго типа ведут себя адаптивно.

Условно единицы первого типа можно назвать «разведчиками» – они лучше информированы и проводят разведку боем, добывая информацию о системе обороны (точнее – о пороговой линии) для других единиц (второго типа).

Результаты имитационного моделирования для рассмотренных вариантов поведения боевых единиц можно найти в работах [176; 178].

Далее рассмотрим имитационную модель боевых действий подразделений в наступлении, обороне и встречном бою.

#### 4.4.3. Имитационная модель боя подразделений

Рассмотрим постановку задачи на разработку имитационной модели наступательного, оборонительного (встречного) боя подразделений (ротных тактических групп). Пусть имеется поле боя прямоугольной формы и разграничительные линии сторон (рис. 4.4.2).

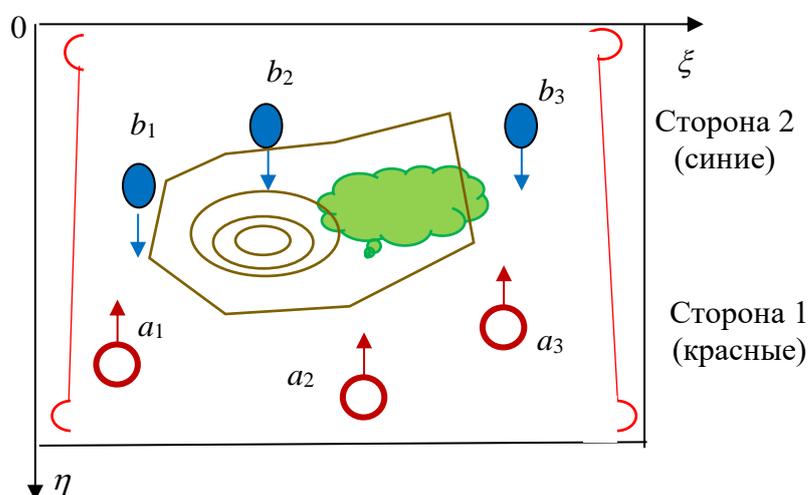


Рис. 4.4.2. Поле боя и боевые единицы сторон

Разграничительные линии наносятся на глубину боевой задачи (на предельную дальность стрельбы штатных и приданных (поддерживающих) средств, в тыл – на глубину построения боевого порядка. Также учитываются разграничительные линии с соседями. Возможны два варианта: боевым единицам или запрещается выходить за разграничительные линии, или, в случае выхода за них, назначается штраф (снижается эффективность достижения поставленной задачи и т. д.). Учет рельефа местности на электронной карте обычно выполняется с помощью регулярной сетки (квадраты, прямоугольники, треугольники) или триангуляционной сети, что, в частности, позволяет оперативно рассчитывать зоны видимости. Также по карте определяется проходимость местности (для техники только по дорогам или везде) и другие ее характеристики.

В распоряжении сторон имеются боевые единицы  $a_i$ ,  $i = 1, \dots, R_a$  и  $b_j$ ,  $j = 1, \dots, R_b$ . Каждая единица принадлежит некоторому типу  $k$  (пехотинец, БТР, ПТУР, танк и т. д.),  $k = 1, \dots, K$ , где  $K$  – количество типов единиц. Факт принадлежности некоторой единицы к определенному типу может быть учтен с помощью векторов  $x = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_{R_a})$  и  $y = (y_1, \dots, y_j, \dots, y_{R_b})$ , где  $x_i$  и  $y_j$  – номера типов боевых единиц. Для каждого типа  $k$  заданы численности экипажа (расчета) боевой единицы первой  $N_k^a$  и второй  $N_k^b$  стороны,  $k = 1, \dots, K$ . Обычно единицы первого типа ( $k = 1$ ) полагаются самыми массовыми и малоэффективными, например, пехотинец с автоматической винтовкой (автоматом) и ручными гранатами. С увеличением номера типа ценность боевой единицы растет. Для упрощения компьютерной реализации модели можно положить, что величины  $a_i$  и  $b_j$  имеют значения численностей их экипажей.

У первой (второй) стороны имеется  $M_x$  ( $M_y$ ) групп, действующих относительно самостоятельно: каждой из групп назначается место в боевом порядке (например, танки должны действовать, не отрываясь от пехоты) и основное направление (маршрут) движения. Вместе с тем, группам дается возможность отклоняться от поставленной задачи для решения внезапно возникающих задач. Факт принадлежности единицы к  $s$ -й группе будем обозначать  $a_{is}$  и  $b_{js}$ .

Заданы начальные координаты единиц (в момент времени  $t = 0$ ):  $(\xi_i^a(0), \eta_i^a(0))$ ,  $i = 1, \dots, R_a$  и  $(\xi_j^b(0), \eta_j^b(0))$ ,  $j = 1, \dots, R_b$ , причем расстояние между единицей  $i$  первой стороны и единицей  $j$  второй равно:

$$l_{ij}(t) = \sqrt{(\xi_i^a(t) - \xi_j^b(t))^2 + (\eta_i^a(t) - \eta_j^b(t))^2}. \quad (4.4.6)$$

Боевые единицы сторон (по типам) имеют следующие характеристики (могут меняться в зависимости от особенностей рельефа, растительности и других особенностей местности):

- $v_k$  ( $w_k$ ) – средняя скорость боевого перемещения единицы типа  $k$  первой (второй) стороны, км/час;
- $G$  ( $H$ ) – матрица дальностей обнаружения противника боевыми единицами первой (второй) стороны с вероятностью 0,9, км;
- $C$  ( $D$ ) – матрица дальностей эффективного поражения противника боевыми единицами первой (второй) стороны с вероятностью 0,9, км.

Для учета особенностей оборонительного боя указанные характеристики должны учитывать степень подготовки обороны (при заранее подготовленной обороне поразить обороняющихся сложнее) и, возможно, зависеть от времени, чтобы учесть в динамике подготовку обороны.

Матрицы дальностей квадратные, размера  $K$ , например,  $C = (c_{ij})$ , где  $c_{ij}$  – дальность поражения единицы противника  $j$ -го типа единицей первой стороны типа  $i$ . Отметим, что вместо дальностей значениями матриц могут быть величины параметров показательного закона. Дальности обнаружения целей ограничены значением  $d_{\Delta}$  – максимально возможная дальность обнаружения, зависящая от рельефа местности и растительного покрова.

Дополнительно сторонами могут использоваться разведчики (беспилотные летательные аппараты – БЛА), эффективность которых задана долями  $\pi_x$  и  $\pi_y$  обнаруживаемых единиц противника на каждом шаге боя. Доли со временем не меняются.

Предположим, что время дискретно и меняется с шагом  $\Delta t$  (например, 1 минута или 10 минут),  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ ,  $t_0 = 0$ . Положим, что перемещение единицы за время  $\Delta t$  может выполняться в любом направлении (с учетом ограничений на выход с поля боя). Возможные направления дискретны, т. е. равны:

$$\Delta\alpha\tau, \quad \tau = 0, \dots, K_{\tau}, \quad \Delta\alpha = \frac{2\pi}{K_{\tau}}. \quad (4.4.7)$$

После перемещения<sup>1</sup> в выбранном направлении единица готовится к стрельбе в этом направлении. В общем случае эффективность поражения одиночной цели (как подвижной, так и движущейся) зависит от угла ее обстрела (в лоб, сбоку, с тыла), см. рис. 4.4.3.

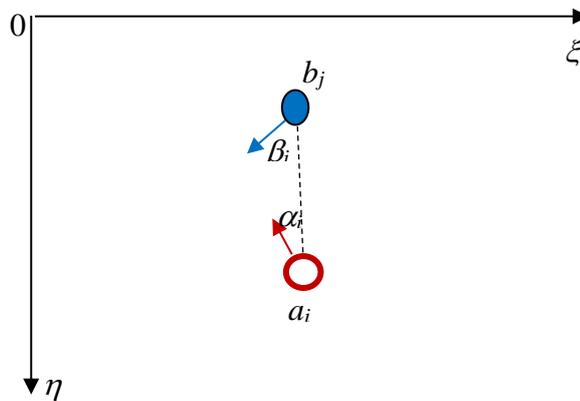


Рис. 4.4.3. Углы стрельбы и поражения боевых единиц

На рисунке пунктирная линия есть линия стрельбы боевых единиц сторон, а линии со стрелками – направления их перемещения и готовности к стрельбе. Вероятность поражения противника минимальна при стрельбе по нему в лоб. Если угол поражения (угол между линией стрельбы и направлением перемещения) увеличивается, то вероятность поражения снижается. С дос-

<sup>1</sup> Обороняющиеся единицы могут находиться на месте.

таточной для тактической модели точностью можно ограничиться линейной зависимостью вероятностей поражения от угла:

$$p_{ij}(\beta_j) = 1 - (1 - p_{ij}) \frac{\pi - s_k \beta_j}{\pi}, \quad q_{ji}(\alpha_i) = 1 - (1 - q_{ji}) \frac{\pi - s_k \alpha_i}{\pi}, \quad (4.4.8)$$

где:  $p_{ij}$  ( $q_{ji}$ ) – вероятность поражения  $i$ -й единицей цели  $j$  ( $j$ -й единицей цели  $i$ ) при стрельбе в лоб (см. матрицы  $C$  и  $D$ );  $\alpha_i$  ( $\beta_j$ ) – угол поражения цели  $i$  (цели  $j$ );  $0 \leq s_k \leq 1$  – параметр поражения цели  $k$ -го типа. При  $s_k = 0$  вероятность поражения цели не зависит от угла поражения, при  $s_k = 1$  стрельба с тыла ( $\alpha_i = \pi$ ,  $\beta_j = \pi$ ) обеспечивает гарантированное поражение цели.

Основными способами маскировки боевых единиц являются скрывание и имитация (включая демонстративные действия). Положим, что помимо индивидуальных средств маскировки подразделение имеет возможность выделить средства для скрывания единиц некоторых групп и имитации единиц других групп. Скывание (имитация) единиц учитывается, во-первых, снижением (увеличением) дальностей обнаружения противником (см. матрицы  $G$  и  $H$ ) и, во-вторых, изменением вероятностей  $\pi_x$  и  $\pi_y$  обнаруживаемых единиц с помощью БПЛА.

Основными видами маневра в бою являются: охват, обход, отход и смена позиций. Положим, что группам (отделениям) указывается только направление (маршрут) дальнейшего наступления (перемещения). В каком порядке перемещаться на поле боя (походном, предбоевом или боевом, см. рис. 4.4.4), решает командир подразделения, исходя из оценки обстановки и данных разведки. Перемещение в походном порядке выполняется с увеличенной скоростью. Если группа разнородна, то ее скорость в походном порядке берется максимальной<sup>1</sup> из всех входящих в ее состав единиц (например, пехотинцы перемещаются на БМП или десантом на танке). При этом для каждой группы указывается, на какой единице перемещается вся группа. В предбоевом и боевом порядке скорость перемещения группы берется минимальной из всех входящих в ее состав единиц.

Возможны две постановки задачи моделирования встречного боя.

*Первая задача.* Заданы начальные положения групп и состав каждой из них. Требуется найти оптимальные действия сторон.

*Вторая задача.* Задан состав подразделения (боевые единицы по типам). Требуется сформировать оптимальный состав групп.

<sup>1</sup> Если группа – это взвод или рота, то скорость определяется как минимальное значение из максимальных скоростей отделений (танков).

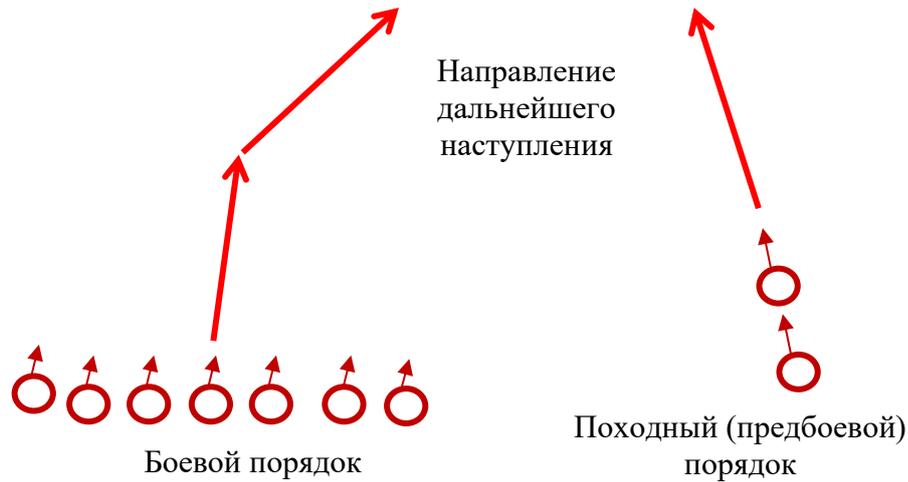


Рис. 4.4.4. Перемещение боевых единиц

В обеих задачах в начальный момент боя группы расположены в походном порядке на определенном расстоянии между ними по фронту в начале (конце) поля боя. Далее будем рассматривать только первую задачу. Для каждой группы указано место каждой единицы в группе и расстояние между единицами  $\rho_x$  и  $\rho_y$ .

На начальном шаге боя ( $t_0 = 0$ ) командиры подразделений оценивают по данным разведки положение противника и назначают своим группам направления (маршруты) перемещения. В общем случае группы могут быть разведывательно-боевыми (с задачей своевременно обнаружить противника и вынудить его развернуться в боевой порядок) и боевыми.

За шаг боя  $\Delta t$  группы сторон или перемещаются, или остаются на месте, или разворачиваются в боевой (предбоевой, походный) порядок. После перемещения выполняется стрельба по противнику.

Целевые функции первой и второй стороны:

$$W_x(t) = \alpha_x \sum_{i \in I(t)} \sum_{j \in J(t)} p_{xij}(l_{ij}) \pi_{xij}(l_{ij}) R_x(i, j) + (1 - \alpha_x) \sum_{j \in J(t)} \sum_{i \in I(t)} [1 - p_{yji}(l_{ij}) \pi_{yji}(l_{ij})] R_y(j, i), \quad (4.4.9)$$

$$W_y(t) = \alpha_y \sum_{j \in J(t)} \sum_{i \in I(t)} p_{yji}(l_{ij}) \pi_{yji}(l_{ij}) R_y(j, i) + (1 - \alpha_y) \sum_{i \in I(t)} \sum_{j \in J(t)} [1 - p_{xij}(l_{ij}) \pi_{xij}(l_{ij})] R_x(i, j), \quad (4.4.10)$$

где:  $0 < \alpha_x$  ( $\alpha_y$ )  $< 1$  – параметр решительности первой (второй) стороны;  $p_{xij}$  ( $p_{yji}$ ) – вероятность обнаружения  $j$ -й единицы противника  $i$ -й единицей первой стороны ( $i$ -й единицы противника  $j$ -й единицей второй стороны);  $\pi_{xij}$  ( $\pi_{yji}$ ) – вероятность поражения  $j$ -й единицы противника  $i$ -й единицей первой стороны

( $i$ -й единицы противника  $j$ -й единицей второй стороны);  $I(t)$  и  $J(t)$  – множества непораженных боевых единиц сторон на шаге  $t$ ;  $R_x(i, j)$  и  $R_y(j, i)$  – правила выбора цели для поражения. Вероятности обнаружения единиц противника рассчитываются с учетом возможностей средств воздушной разведки (вероятности  $\pi_x$  и  $\pi_y$ ) и значений матриц  $G$  и  $H$ . С помощью датчика случайных чисел по вероятностям  $\pi_x$  и  $\pi_y$  на каждом шаге определяются конкретные цели противника, которые достоверно обнаружены.

Боевая единица на каждом шаге выполняет стрельбу по следующему правилу:

1) стрельбу начинает первая по порядку боевая единица при условии, что хотя бы одна цель противника обнаружена с вероятностью не ниже критической (например,  $P_{kr} > 0,4$ );

2) среди обнаруженных целей выбирается цель с максимальной вероятностью обнаружения и ее поражения. Если таких целей несколько, то выбирается ближайшая;

3) факт поражения цели (реализуется с использованием датчика случайных чисел, соответствующие значения величин  $a_i$  и  $b_j$  принимаются равными нулю) сразу становится известным обоим сторонам. В последующем по пораженным целям стрельба не ведется.

Бой прекращается, если на шаге  $t$  потери одной из сторон достигли определенного предела. Эта сторона признается проигравшей. Если у обеих сторон на шаге  $t$  потери достигли заданного предела, то признается ничья.

Условия прекращения боя:

$$\frac{\sum_{i \in I(t)} a_i}{\sum_{i \in I(0)} a_i} \geq \varepsilon_x, \quad \frac{\sum_{j \in J(t)} b_j}{\sum_{j \in J(0)} b_j} \geq \varepsilon_y, \quad (4.4.11)$$

где  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  – доли потерь, выдерживаемые первой и второй стороной.

**Компьютерная реализация модели боя.** По М.П. Осипову, свидетельством правильности моделей боя является соответствие результатов моделирования принципам ведения боевых действий. Для проверки алгоритма разработана компьютерная реализация имитационной модели встречного боя (рис. 4.4.5, 4.4.6).

Начальное положение единиц на поле боя, их тактические характеристики (по трем типам) и количество задаются пользователем.

В программе также задаются:

- параметры решительности сторон;
- выдерживаемые сторонами проценты потерь;

– доли обнаруживаемых целей противника с помощью БЛА на каждом шаге боя.

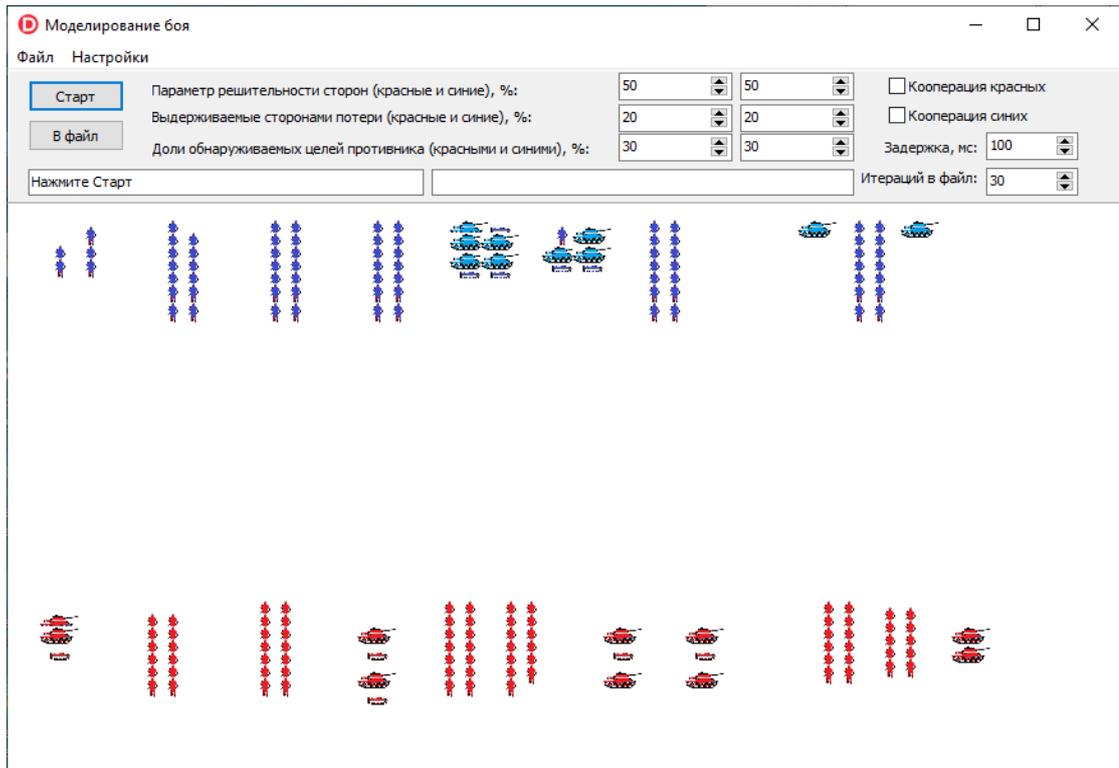


Рис. 4.4.5. Начальное положение единиц на поле боя

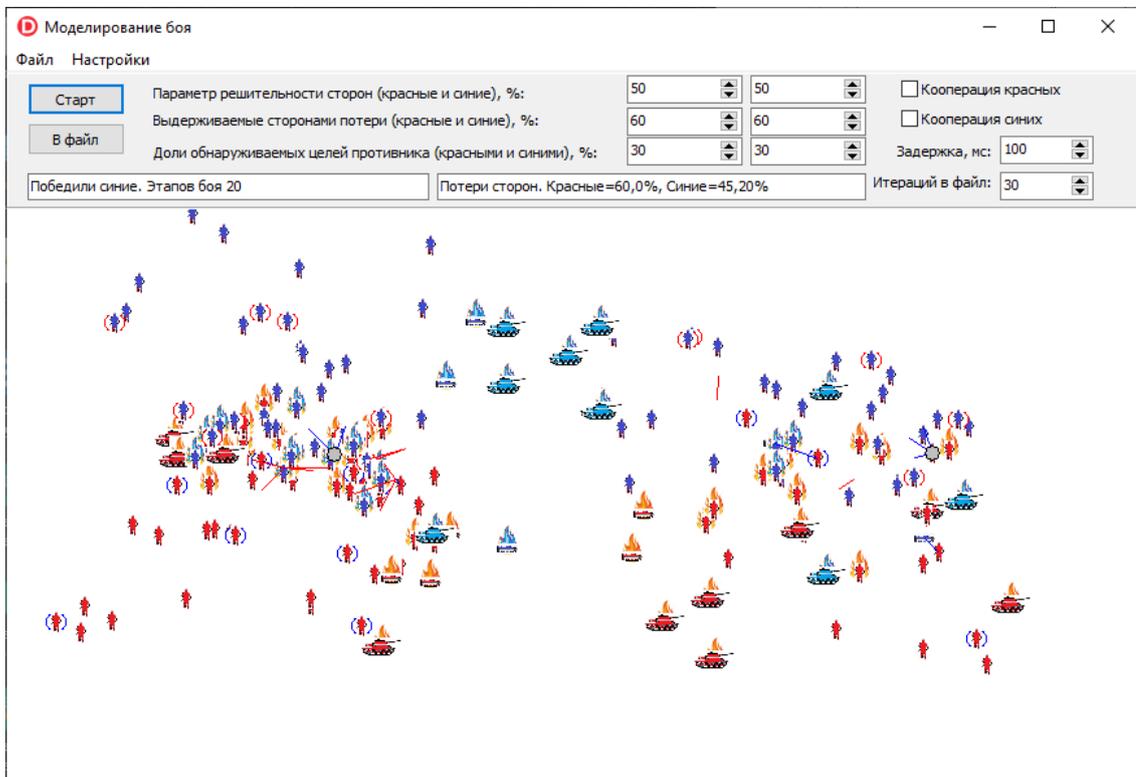


Рис. 4.4.6. Исход боя

Возможен как отдельный розыгрыш боя, так и серия боев (итераций) с сохранением результатов по каждому бою в серии.

Отдельные единицы в группы не объединяются. Каждая единица выбирает точку следующего перемещения с учетом параметра решительности (при малом значении параметра перемещение происходит в точку, где меньше вероятность поражения единицы противником; при большом – в точку с максимальной вероятностью поражения противника).

При равном количестве боевых единиц (90 единиц у каждой стороны) с одинаковыми возможностями по трем типам (пехотинцы, танки и ПТУР), 60% выдерживаемых потерь и 30% обнаружений целей противника с помощью БЛА каждой стороной выполнены серии по 30 боев в каждой итерации.

Зависимость исхода боев от параметра решительности первой стороны (красных) показана на рис. 4.4.7.



*Рис. 4.4.7. Зависимость вероятности победы красных от решительности их единиц*

На рисунке сплошная линия – вероятность победы красных при решительности синих 50%, пунктирная линия – при 25% решительности синих.

Результаты моделирования подтверждают важнейший принцип общевойскового боя – высокая активность, решительность и непрерывность его ведения.

Из анализа представленных и других имитационных моделей боевых действий можно сделать вывод, что имитационное моделирование является скорее искусством, чем наукой, поскольку реалистичность моделей и их

полезность в существенной степени зависит от правильного выбора учитываемых факторов.

Перспективными направлениями исследований представляются следующие:

- разработка тактических имитационных моделей общевойсковых действий различного масштаба – начиная от боя взводов и отделений и заканчивая боевыми действиями бригад и дивизий;

- сочетание моделей коллективного и командного поведения боевых единиц;

- учет в моделях всех видов боевого и материально-технического обеспечения, существующих и перспективных образцов вооружения и военной техники;

- комплексирование теоретико-игровых, имитационных моделей и моделей динамики боя.

## ГЛАВА 5. МОДЕЛИ БОЕВЫХ ДЕЙСТВИЙ НА МОРЕ

Настоящая глава состоит из четырех разделов. В первом рассмотрены основные методы моделирования боевых действий на море. Второй раздел посвящен описанию теоретико-игровых моделей боевых действий на море. В третьем разделе представлены результаты моделирования противодействия торпедному оружию. Четвертый раздел посвящен моделированию поиска и обнаружения морских подводных объектов, пятый – моделированию поиска морского подводного объекта по следу.

### 5.1. Имитационные модели боевых действий

К формам оперативного применения объединений и группировок сил и войск ВМФ относятся: операции, боевые действия, систематические боевые действия, сражения, удары, минно-заградительные действия, систематические минно-заградительные действия<sup>1</sup>.

Боевые действия группировки разнородных сил (соединения, части, корабли) могут состоять из боев, ударов, атак, преследования противника, поисковых, следящих, противоминных, минных постановок, направленных на поражение противника, его войск, сил, средств, высадку морского десанта и овладение его территорией для достижения боевого успеха в решении поставленных задач<sup>2</sup>.

#### 5.1.1. Методы моделирования боевых действий на море

Вооруженное противоборство на море является трудно формализуемым процессом, протекающим во времени и пространстве в условиях неопределенности с учетом того, что противоборствующие стороны стремятся ввести друг друга в заблуждение [93].

---

<sup>1</sup> Формы оперативного применения объединений и группировок сил и войск ВМФ. – URL: <https://dictionary.mil.ru/folder/123101/item/127725/> (дата обращения – 06.06.2024).

<sup>2</sup> Боевые действия группировки разнородных сил (соединения, части, корабля). – URL: <https://dictionary.mil.ru/folder/123101/item/127735/> (дата обращения – 06.06.2024).

Сложность описания процессов, составляющих основу вооруженного противоборства, заключается также в необходимости учета поведенческих моделей лиц, принимающих решение, в одинаковых условиях обстановки.

Соответственно, задача математического моделирования вооруженного противоборства становится весьма нетривиальной (нестандартной) задачей.

Традиционно принята следующая классификация методов математического моделирования (см. также классификацию моделей в разделе 1.3):

1. *Аналитические методы.* К ним относятся классические методы математического анализа, теории вероятностей, известные с давних пор, а также методы, разработанные сравнительно недавно, зачастую специально для нужд исследования операций.

2. *Статистические методы.* К ним относятся как непосредственно методы математической статистики, так и основанные на них методы, например, метод статистических испытаний (метод Монте-Карло), последовательный анализ.

3. *Методы численной оптимизации* (математического программирования). К их числу относятся различные классы линейного, нелинейного, динамического программирования, случайный поиск, методы, основанные на принципе максимума Понтрягина. Методы были разработаны для нужд исследования операций, поскольку известные в классической математике методы нахождения экстремумов функций одной и нескольких переменных, вариационное исчисление не всегда адекватны соответствующим задачам управления.

4. *Методы оптимизации в условиях неопределенности.* К ним относятся различные классы методов теории игр («игра с человеком»), теории статистических решений («игра с природой»), дифференциальные игры многих игроков (например, «Missile-Defender-Target»-игра).

Использование методов аналитического моделирования для оценки эффективности боевых действий на море позволяет обеспечить получение однозначных результатов и отчетливо отразить в модели основные закономерности, присущие объектам боевого пространства. Однако для того, чтобы результат моделирования получился наиболее точным и полным, модель должна в явном виде содержать все зависимости, связывающие искомые выходные величины со всеми входными и промежуточными параметрами, характеризующими объекты моделирования и условия окружающей обстановки. Как правило, это удается выполнить только для сравнительно простых условий моделирования.

При разработке аналитических моделей сложных систем, каковыми и являются боевые действия на море, для того чтобы представить в формализованном виде процессы взаимодействия между их различными компонентами, как правило, приходится идти на различные упрощения [66]. Это, несомненно, приводит к отличию модели от реальности. В случаях, когда объекты моделирования настолько сложны и многообразны, что аналитическая модель становится слишком грубым приближением к действительности, в интересах повышения точности и достоверности оценки эффективности, могут быть использованы методы имитационного моделирования.

Имитационные модели боевых действий на море основаны на статистических методах [328].

Развитие робототехнических комплексов различного назначения, выполняющих широкий спектр боевых задач, определяет облик будущих вооруженных конфликтов. Поскольку возможности прогнозирования исхода боевых действий должны целиком опираться на цифровое пространство и цифровые модели сил и средств, принимающих участие в операциях. Более того, например, в настоящее время для противоторпедной защиты применяются неинтеллектуальные средства гидроакустического противодействия, действующие поодиночке и не способные взаимодействовать друг с другом для совместного противодействия атакующей торпедой. Тогда среда моделирования должна помочь в формализации и получении решений нового класса задач формирования миссий группового применения устройств гидроакустического противодействия, формирующих распределенную в пространственно-временной-частотной области оптимальную помеху системе самонаведения торпедного оружия, сочетающих в себе единое фазовое пространство всех подвижных объектов и решающих общую дискретно-непрерывную оптимизационную задачу.

### ***5.1.2. Классификация имитационных моделей***

*Имитационное моделирование* – это метод научного исследования, основанный на замене реального объекта его компьютерной моделью и дальнейшем проведении над ней экспериментов, в ходе которых обеспечивается возможность многократного воспроизведения различных состояний исследуемого объекта и условий его функционирования.

Под *имитацией* понимается процесс, включающий в себя:

- разработку математической модели, позволяющей воспроизводить различные состояния моделируемого объекта (системы, процесса) и условия его функционирования;

- планирование вычислительного эксперимента и проведение исследования с использованием разработанной модели;

- обработку результатов моделирования.

В качестве отличительных особенностей имитационного моделирования можно выделить следующее:

- при имитационном моделировании сложной системы законы её функционирования могут быть в точности не известны; для разработки модели достаточно знания алгоритмов, описывающих поведение отдельных её элементов и связей между ними;

- использование методов имитационного моделирования в некоторых случаях позволяет выявить не выраженные в явном виде связи между отдельными параметрами и характеристиками исследуемой системы;

- при имитационном моделировании оценки значений выходных параметров (например, эффективности ведения боевых действий) модели обычно получают путем статистической обработки результатов, полученных при многократных испытаниях модели в ходе проведения вычислительного эксперимента.

*Имитационная модель* представляет собой совокупность логических связей и функциональных отношений, описывающих логику работы элементов исследуемой системы.

Классификация имитационных моделей может быть произведена по следующим классификационным признакам, представленным на рис. 5.1.1:

- по состоянию во времени;

- по степени влияния случайных факторов;

- по виду зависимости выходных данных;

- по полноте представления свойств исследуемой системы.

По состоянию во времени имитационные модели могут быть статическими или динамическими. Статическая имитационная модель разрабатывается для исследования состояния системы в определённый фиксированный момент времени, а также для исследования систем, в которых время не играет роли. Примерами статической имитационной модели являются модели, созданные по методу Монте-Карло. Динамическая имитационная модель разрабатывается для исследования систем, состояние которых изменяется во времени. Например – модель процесса отражения удара средств воздушного нападения, модель поисковых действий, модели перехвата [97] и т. д.



*Рис. 5.1.1. Классификация имитационных моделей*

По степени учета случайных факторов имитационные модели могут быть детерминированными или стохастическими. Детерминированная имитационная модель не содержит вероятностных (случайных) компонентов и позволяет получить конечный результат во всех случаях, когда заданы все исходные данные и зависимости между выходными и входными параметрами, даже если это потребует значительных затрат машинного времени. Стохастическая имитационная модель в качестве входных данных всегда содержит один или несколько случайных параметров, в силу чего выходные параметры модели также являются случайными величинами и могут рассматриваться лишь как оценки истинных характеристик исследуемой системы. Примером такой системы является движение подводного аппарата в неизвестной и переменной среде [208].

По виду зависимости выходных данных имитационные модели могут быть непрерывными либо дискретными. В непрерывной имитационной модели выходные параметры представляют собой непрерывную функцию от входных величин. В дискретной имитационной модели выходные параметры представляют собой зависимость от входных величин, изменение которых производится с определенным шагом или принимает конечное число значений.

По полноте представления свойств исследуемой системы имитационные модели могут быть структурными и функциональными. Структурные имитационные модели отображают только структуру исследуемой системы,

без учета особенностей происходящих в ней процессов. Функциональные имитационные модели отображают как структуры, так и процесс функционирования исследуемой системы. При разработке функциональных имитационных моделей производится, как правило, разбиение модели на функциональные моделирующие блоки.

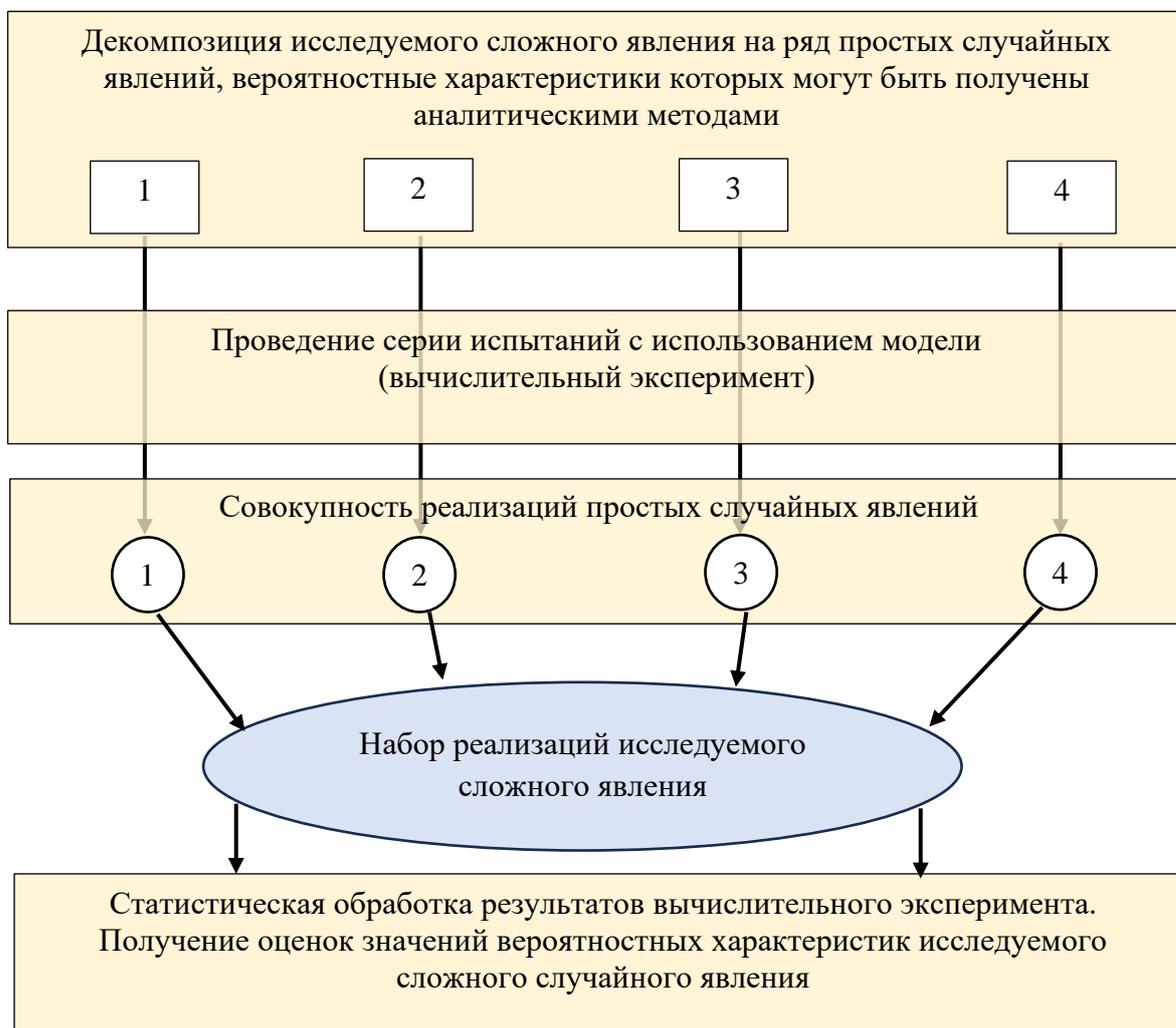
Имитационные модели боевых действий на море, в соответствии с вышеизложенным, можно отнести к динамическим, стохастическим и функциональным.

### ***5.1.3. Сущность имитационного моделирования и области его применения***

При имитационном моделировании обычно производят декомпозицию замысла (плана) ведения боевых действий (сложного случайного явления) на ряд простых действий (простых случайных явлений), получение вероятностных характеристик которых может быть обеспечено аналитическими методами и сравнительно легко реализовано в модели (например, вероятность обнаружения подводной лодки противника гидроакустическим комплексом в конкретных условиях обстановки). Затем, в ходе проведения моделирования, производят серию «розыгрышей» имитационной модели. В каждом отдельном «розыгрыше» получают значения (реализации) соответствующих вероятностных характеристик простых явлений, вся совокупность которых составляет реализацию сложного случайного явления (боевых действий). Таким образом, по окончании вычислительного эксперимента (проведения серии «розыгрышей») имеется определённый набор реализаций исследуемого сложного случайного явления (статистическая выборка). Оценки значений вероятностных характеристик сложного случайного явления (эффективности ведения боевых действий) формируются на основе соответствующей обработки полученных данных, основанной на использовании методов математической статистики.

Таким образом, основу имитационного моделирования составляют методы математической статистики (методы статистических испытаний) [297]. Поэтому можно сказать, что под имитационным моделированием понимается некоторая процедура, позволяющая осуществлять искусственное формирование статистической выборки и её последующую обработку с целью получения оценок значений параметров исследуемой сложной системы.

На рисунке 5.1.2 представлена общая схема статистической оценки вероятностной характеристики сложного случайного явления.



*Рис. 5.1.2. Общая схема статистической оценки вероятностной характеристики сложного случайного явления*

#### **5.1.4. Общая структура имитационной модели и методика ее разработки**

Оценка эффективности ведения боевых действий на море с применением методов имитационного моделирования сводится к решению следующих задач:

– разработка имитационной модели, при помощи которой будет воспроизводиться (имитироваться) процесс вооруженного противоборства;

- проведение серии «розыгрышей» с использованием разработанной модели (вычислительный эксперимент); в ходе каждого «розыгрыша» производится: а) имитация воздействия на исследуемую систему случайных факторов; б) расчёт значений выходных параметров модели при смоделированных исходных данных;

- статистическая обработка результатов вычислительного эксперимента;

- получение оценок значений выходных параметров модели (показателей эффективности ведения боевых действий).

Самой важной по приоритету задачей является задача разработки имитационной модели. В самом общем случае имитационную модель, как систему математических соотношений и логических операций, ориентированную на решение определённых задач, образуют две подсистемы:

- подсистема имитации состояний моделируемой системы;
- подсистема обработки результатов моделирования.

Подсистема имитации состояний моделируемой системы обеспечивает:

- формирование значений параметров различных случайных факторов, оказывающих воздействие на моделируемую систему в процессе её функционирования;

- вычисление значений выходных параметров модели (показателей эффективности ведения боевых действий).

В ходе моделирования осуществляется многократное воспроизведение хода ведения боевых действий (проводится серия «розыгрышей»). Поскольку значения входных воздействий в каждом отдельном «розыгрыше» формируются случайным образом, то и значения выходных параметров модели (показателей эффективности ведения боевых действий) в каждом отдельном «розыгрыше» будут также случайны. Таким образом, в качестве результатов моделирования, сформируется массив реализаций исследуемых случайных величин (статистическую выборку значений выходных параметров модели). Подсистема обработки результатов моделирования позволяет, на основе использования методов математической статистики, произвести обработку этого массива. В результате такой обработки будут получены оценки значений исследуемых характеристик моделируемой системы (показателей эффективности).

Независимо от принципа построения имитирующего алгоритма и цели моделирования, методика разработки имитационной модели подразумевает последовательное выполнение ряда этапов, представленных на рисунке 5.1.3.

В имитационных моделях различные случайные факторы, присущие ведению боевых действий в условиях неопределенности, представляются обычно, в зависимости от их особенностей и физической природы, как случайные события, случайные величины или случайные процессы.

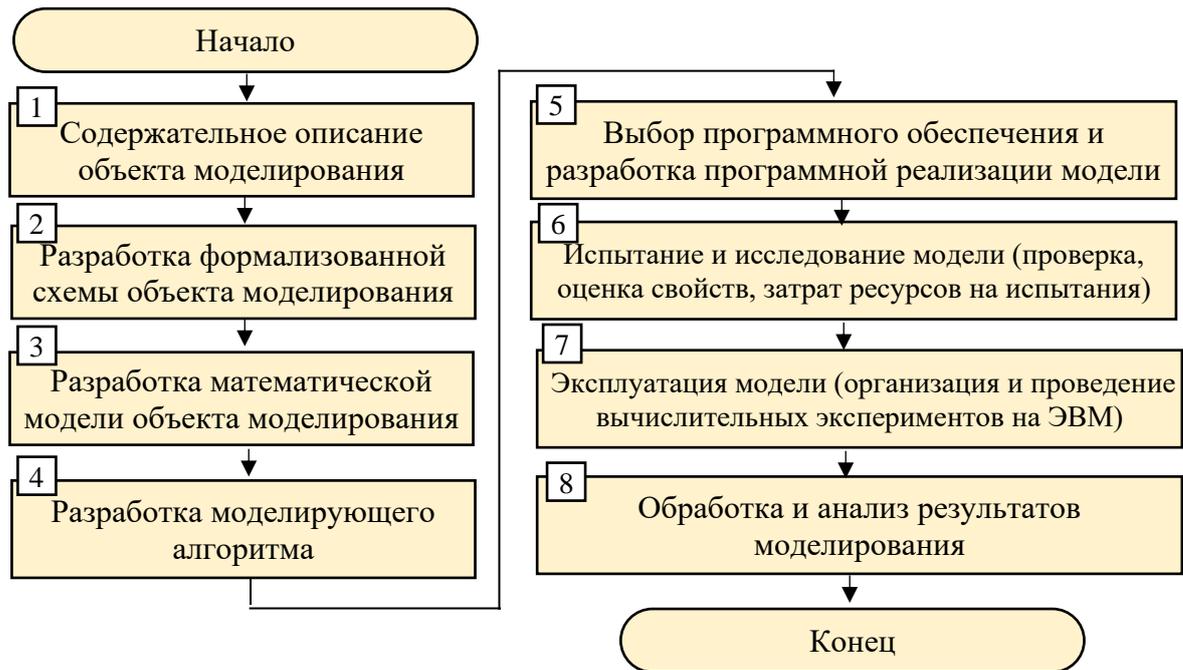


Рис. 5.1.3. Методика разработки имитационной модели

Во всех системах, предназначенных для проведения имитационного моделирования, имеются встроенные генераторы, позволяющие формировать последовательности псевдослучайных чисел. Эти числа называются псевдослучайными потому, что, хотя их значения и формируются в строгом соответствии с некоторыми детерминированными алгоритмами, но их статистические свойства совпадают со статистическими свойствами «истинно» случайных чисел.

Исходным материалом для моделирования случайных событий и случайных величин служат случайные числа, имеющие равномерное распределение в пределах интервала  $[0; 1]$ .

Например, вероятность обнаружения подводной лодки равна 0,6. Генератор случайных (псевдослучайных) чисел выдал значение 0,4. Следовательно, обнаружение подводной лодки состоялось, рисунок 5.1.4.



*Рис. 5.1.4. Моделирование случайных событий*

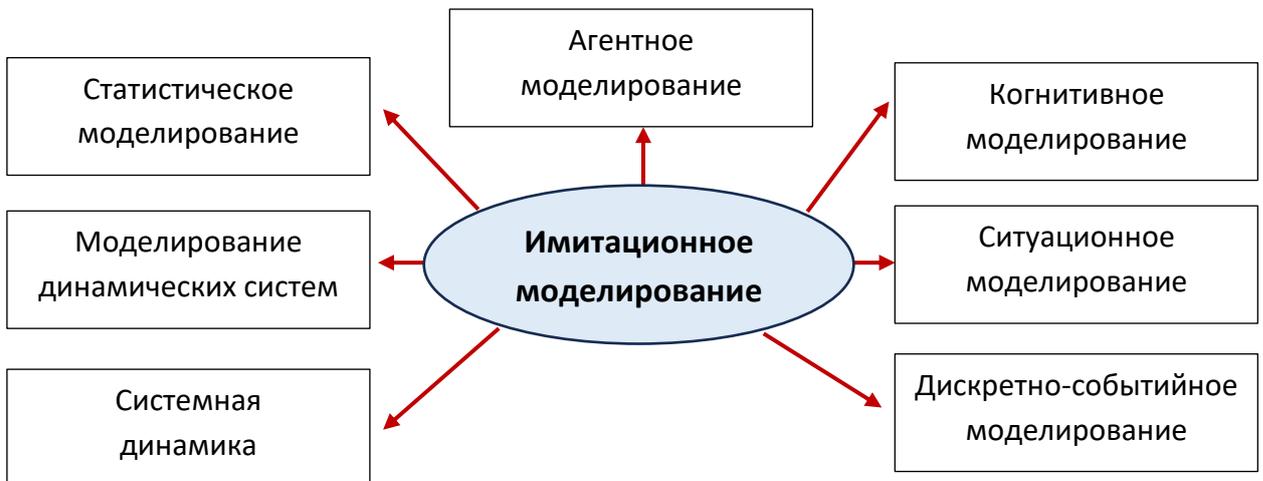
В настоящее время разработаны и другие, более сложные методы моделирования случайных событий, случайных величин и случайных процессов, но основой в них выступает генератор случайных (псевдослучайных) чисел.

### **5.1.5. Основные концептуальные подходы к разработке имитационных моделей боевых действий на море**

Известно, что исследование сложных систем с использованием методов имитационного моделирования целесообразно в тех случаях, если:

- по тем или иным причинам сложно или невозможно построить аналитическую модель исследуемой системы;
- необходимо имитировать поведение системы во времени, при изменении внутренних и внешних условий ее функционирования.

В настоящее время различают ряд направлений имитационного моделирования. Некоторые из них приведены на рисунке 5.1.5.



*Рис. 5.1.5. Основные направления имитационного моделирования*

*Статистическое (численное) моделирование* предполагает получение статистических оценок выходных параметров модели путём многократного воспроизведения исследуемого процесса при помощи его имитационной модели. Такой подход к исследованию получил название «метод статистических испытаний» или «метод Монте-Карло» и применим в случаях, когда входные параметры и (или) функциональные соотношения между различными компонентами модели содержат элементы случайности (или являются случайными процессами) и подчиняются вероятностным законам [102].

Для получения оценок выходных параметров модели производится многократная машинная имитация (воспроизведение) процесса функционирования исследуемой системы, а затем – обработка полученных результатов методами математической статистики.

В процессе каждого «прогона» модели производится имитация воздействия случайных факторов на различные её компоненты. Каждое такое воздействие представляется в виде «розыгрыша» соответствующего случайного явления с заданными вероятностными характеристиками. Выходные параметры модели, вычисленные с использованием результатов множества подобных «розыгрышей» в ходе одного варианта имитации («прогона»), представляют собой одну реализацию (историю) процесса. Множество таких реализаций, накопленных в ходе проведения вычислительного эксперимента, представляет собой первичный статистический материал. В результате его обработки получают статистические оценки выходных параметров модели.

Под *динамической системой* понимают любой объект, процесс или явление, для которого однозначно определены его возможные состояния, как совокупности значений некоторых величин, и заданы законы, описывающие изменение исследуемых состояний во времени.

В основе моделирования динамических систем лежит так называемый агрегативный подход, который был заложен в 1960–70-х годах советским учёным Н. П. Бусленко [66]. При разработке модели исследуемая сложная система представляется в виде агрегата («чёрного ящика»).

Суть моделирования заключается в том, чтобы представить исследуемую систему в виде конечного числа взаимосвязанных и взаимодействующих друг с другом и внешней средой подсистем, а затем описать динамику поведения этой системы при помощи систем дифференциальных или интегральных уравнений, либо уравнениями вида «вход – выход».

*Дискретно-событийный подход* широко применяется при моделировании систем, динамика поведения которых может быть представлена в виде последовательности отдельных операций. При таком подходе процесс функционирования системы представляется совокупностью конечного числа

её дискретных состояний и возможных переходов между этими состояниями. Основными элементами модели в данном случае являются «транзакты» (заявки на обслуживание), которые как бы «замещают» реальные объекты (например, средства воздушного нападения). «Перемещаясь» по модели, транзакты определённым образом обрабатываются другими элементами, представленными в модели как одно- или многоканальные устройства обслуживания заявок (например, объекты системы ПВО). Таким образом, дискретно-событийную модель можно рассматривать как глобальную схему обслуживания заявок (систему массового обслуживания).

*Системная динамика* – парадигма моделирования, которая предполагает представление исследуемой системы в виде графических диаграмм, отображающих причинно-следственные связи протекающих в ней процессов, а также направленность и характер изменения во времени степени их взаимного влияния друг на друга. Имитация созданных на основе таких диаграмм моделей осуществляется с использованием компьютера. Своими методами и инструментами системная динамика позволяет понять структуру и динамику сложных систем. Этот метод моделирования позволяет создавать точные компьютерные модели сложных систем для обоснования их рационального построения и организации функционирования. Методы системной динамики применяются, главным образом, в долгосрочных стратегических моделях, требующих для своей разработки достаточно высокого уровня абстракции.

*Агентное моделирование* – метод, позволяющий исследовать поведение отдельных децентрализованных агентов и то, как оно определяет поведение всей исследуемой системы в целом. Под агентом здесь понимается некая сущность, обладающая активностью, автономным поведением, способная принимать решения в соответствии с некоторым набором правил, взаимодействовать с окружением, а также самостоятельно изменяться. Агентами могут быть люди, тактические единицы, вооружение и технические средства и т. д.

При разработке модели агенты помещаются в определённую среду, т. е. в некоторое пространство, в пределах которого они имеют возможность ориентироваться и передвигаться. Среда, в свою очередь, характеризуется совокупностью параметров, определяющих ее возможные состояния. В процессе функционирования агенты, по определённым правилам, могут взаимодействовать друг с другом и со средой. Правила взаимодействия определяют характер и направленность взаимодействия агентов друг с другом и со средой, устанавливают процедуры принятия решений и выбора стратегии поведения при очередном шаге взаимодействия.

При агентном подходе задача имитационного моделирования заключается в определении параметров, характеризующих текущие состояния агентов и среды; изучении поведения агентов в различных ситуациях взаимодействия и в изменяющихся состояниях среды. Через изучение поведения множества агентов, на основе некоторой системы правил, осуществляется изучение и прогнозирование поведения исследуемой системы в целом.

Таким образом, целью создания агентной модели является получение представлений об общем поведении исследуемой системы на основе предположений об индивидуальном, частном поведении ее отдельных активных объектов при их функционировании в составе этой системы.

*Когнитивное моделирование* применяется для анализа и принятия решений в плохо определённых ситуациях (см. также раздел 2.4 выше). Когнитивная наука в широком смысле слова – это совокупность наук о приобретении, хранении, преобразовании и использовании знания.

Под когнитивными технологиями понимается широкий спектр технологий рационализации и формализации интеллектуальных систем поддержки принятия решений, основанных на обработке экспертной информации и использовании баз знаний. Когнитивные информационные технологии представляют собой совокупность осуществляемых в определённой последовательности методов, приёмов, действий, а также инструментальных средств, позволяющих преобразовать входную информацию в варианты управленческого решения. Когнитивный подход является направлением исследования больших сложных систем (политических, социально-экономических, военных, образовательных, экологических и т. п.). Подходы и методы когнитивного моделирования развиваются в направлении совершенствования аппарата анализа, моделирования и поиска решений в слабоформализуемых и плохо структурированных ситуациях при отсутствии, неполной либо нечёткой информации о происходящих в таких ситуациях процессах.

*Ситуационное моделирование* неразрывно связано с таким понятием как «ситуационное управление». Ситуационное управление – это метод управления сложными организационно-техническими системами, основанный на идеях теории искусственного интеллекта.

Ситуационное моделирование предполагает построение моделей реальных ситуаций и проведение с ними различного рода экспериментов, например – прогнозирование направлений развития ситуации или «проигрывание» предполагаемых решений по управлению ситуацией с целью выбора наилучшего решения. При помощи таких моделей можно «проигрывать» поведение исследуемой системы в различных ситуациях. Поэтому особое

практическое значение имеет создание многовариантных ситуационных моделей, предоставляющих субъекту управления «поисковое поле», на котором производится выбор решения.

Так, одним из направлений ситуационного моделирования является разработка компьютерных тренажёров, в основе которых лежат имитационные модели, которые позволяют обучающимся применять определённый набор инструментов воздействия и управления и воспроизводит реакцию исследуемой системы на соответствующие управляющие воздействия.

Ситуационное моделирование также лежит в основе систем ситуационного отображения информации, позволяющих решать задачи управления различного рода динамическими объектами (используются в центрах управления различного назначения, ситуационных центрах и т. д.).

#### ***5.1.6. Перспективы развития методов имитационного моделирования***

Имитационное моделирование в настоящее время является одним из основных инструментов исследования сложных организационно-технических систем, в том числе и военного назначения, функционирующих в условиях неопределённости. Универсальность его заключается в том, что методы имитационного моделирования позволяют создавать модели-имитаторы работы этих систем при неполной информации о ряде процессов в моделируемых объектах. Роль имитатора выполняет компьютерная программа (или комплекс программ), которая называется имитационной моделью.

В настоящее время основными направлениями построения и использования имитационных моделей являются следующие:

1. Разработка моделей, предназначенных для выявления функциональных соотношений. Такие модели позволяют определить закономерности между двумя или несколькими факторами, воздействующими на вход системы и её откликом.

2. Разработка моделей, предназначенных для прогноза, т. е. для оценки поведения исследуемой системы во времени при некотором сочетании условий её функционирования.

3. Разработка моделей для экспертной оценки предлагаемой структуры или конфигурации системы по предлагаемым критериям или совокупности правил, сформулированных с помощью экспертов.

4. Разработка моделей, предназначенных для использования в системах поддержки принятия решений, позволяющих сопоставлять между собой

различные системы, выполняющие одни и те же функции (производить сравнение альтернатив).

5. Разработка моделей, позволяющих производить оптимизацию систем. Эти модели могут использоваться как инструмент для оценки и сравнения вариантов предполагаемых изменений в исследуемой системе или для выработки оптимальной стратегии. Пригодны для решения задач управления (планирования, проектирования) и часто называются интерактивными оптимизационными моделями (системами).

6. Разработка моделей виртуальных игр (виртуальной реальности), позволяющих производить обучение специалистов в различных отраслях.

7. Разработка моделей для анализа чувствительности, т. е. для выявления тех факторов, которые в наибольшей степени влияют на общее поведение исследуемой системы.

8. Разработка моделей, встроенных в некоторый процесс, в технические и автоматизированные установки. Особенностью таких моделей является то, что они должны автоматически запускаться при выполнении соответствующих операций.

9. Разработка моделей для динамической визуализации (демонстрации) проектируемого объекта в целях аргументации разрабатываемого проекта.

Использование ЭВМ для разработки имитационных моделей открывает широкие возможности для внедрения в процесс моделирования интеллектуальных информационных технологий (методов искусственного интеллекта), к которым традиционно относятся технологии:

- мультиагентного моделирования;
- экспертных систем или систем, основанных на знаниях;
- нечёткой логики;
- искусственных нейронных сетей;
- естественных языковых систем и онтологии;
- ассоциативной памяти и ряд других.

Анализ тематики научных конференций, посвящённых рассмотрению различных аспектов в области имитационного моделирования, показывает, что его развитие идёт по следующим направлениям:

- совершенствование теории и методов моделирования;
- совершенствование и разработка методов оценки качества моделей и многомодельных комплексов;
- разработка методов и систем распределённого моделирования;
- моделирование глобальных процессов;
- разработка средств автоматизации и визуального имитационного моделирования;

- развитие методов системной динамики (с обязательным наличием имитационной составляющей);
- разработка приёмов и способов практического применения моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, методик принятия решения по результатам моделирования;
- развитие способов использования методов имитационного моделирования в обучении и образовании [297].

## **5.2. Теоретико-игровые модели боевых действий на море**

В соответствии с классификацией методов математического моделирования, представленной выше, теоретико-игровые модели боевых действий на море основаны на методах теории игр (см. приложение 2).

Одной из самых важных проблем, стоящих перед командующими (командирами) при принятии решения на боевые действия, была и остается проблема выбора наилучшего варианта действий в условиях неопределенности относительно избираемого противником способа действий. Причем решение этой проблемы всегда включает решение частных проблем:

- оценки возможных вариантов действий противника;
- разработки рациональных вариантов применения своих сил;
- отбора лучшего из числа разработанных варианта применения своих сил с учетом неопределенности в отношении того, какой именно вариант действий примет противник.

Подобную ситуацию, складывающуюся при выработке решения, принято называть *конфликтной ситуацией*.

В условиях указанной выше неопределенности всегда активно использовались и будут активно использоваться все возможности сил и средств разведки. Тем не менее в большом числе случаев неопределенность в отношении планируемого противником варианта действий может сохраняться. Теория игр – это теория математического моделирования конфликтных ситуаций [172]. Методы теории игр вначале были применены как инструмент для обоснования лучшего, из числа разработанных, варианта применения своих сил в условиях неопределенности в отношении того, какой именно вариант действий из числа выявленных изберет противник. Еще большее

значение методы теории игр могут иметь в процессе разработки вариантов действий своих сил, прогнозирования возможных действий противника, а также для постановки задач силам разведки и планирования мероприятий оперативной маскировки.

### *5.2.1. Парные стратегические игры*

Существует большое разнообразие классов конфликтных ситуаций. Различным классам ситуаций соответствуют свои методы моделирования. В соответствии с классами конфликтных ситуаций разработана и классификация игр.

Все игры делятся прежде всего на стратегические и нестратегические. Игры, моделирующие конфликтные ситуации, когда действуют не менее двух сторон, каждая из которых выступает со своими вариантами действий (стратегиями), называются стратегическими. Если сторона со своими вариантами действий всего одна либо же существует одна коалиция сторон, все участники которой выступают с одним набором вариантов действий, то игра называется нестратегической.

По числу участвующих сторон стратегические игры делятся на парные (число сторон равно двум) и множественные (число сторон более двух). При моделировании боевых действий на море наибольшее значение имеют парные стратегические игры.

Парные стратегические игры могут быть антагонистическими и неантагонистическими [172]. В антагонистической игре цели действий сторон прямо противоположны. Показатель эффективности выполнения задачи одной стороной является и численной мерой степени невыполнения задачи другой стороной. Другими словами, выигрыш одного игрока есть одновременно проигрыш другого. Если представить дело так, что оба игрока – «выигрывающие», но их выигрыш имеет разные знаки, то сумма выигрышей обеих сторон будет равна нулю, отсюда второе название антагонистических игр «игры с нулевой суммой».

В отличие от антагонистических игр в неантагонистических играх стороны преследуют различные, но не противоположные цели. Выигрыш одного игрока не является в точности проигрышем другого.

Стратегические игры делятся, кроме того, на конечные и бесконечные. Конечные стратегические игры описывают конфликтную ситуацию, в которой все участвующие стороны имеют конечное число возможных вариантов

действий. Если хотя бы одна из сторон имеет бесконечно большое число вариантов действий, игра относится к классу бесконечных игр.

Как конечные, так и бесконечные игры могут быть одно- и многоходовые. Ходом называется выбор стороной одного из предусмотренных вариантов действий. При личном ходе такой выбор делается сознательно, а при случайном – осуществляется случайно, в результате действия объективных закономерностей, неподвластных ни одной из сторон (попадание в цель ракеты, торпеды и т. д.). При одноходовой игре каждая из сторон имеет по одному ходу, при многоходовой игре по крайней мере одна из сторон делает несколько (два и более) ходов.

Многоходовой игрой описывается процесс динамической конфликтной ситуации, длящейся во времени. Существует подкласс многоходовых игр – конечные позиционные игры, которые для их решения интерпретируются как одноходовые игры. Такая интерпретация возможна, если совокупности решений, принимаемых каждой из сторон на всех последовательных шагах процесса, могут быть представлены как некоторое обобщающее решение.

Многоходовые игры, не являющиеся конечными позиционными играми, в свою очередь делятся на две группы в соответствии с особенностями моделируемых конфликтных ситуаций. Одну группу составляют игры, в которых стороны принимают решение в некоторые дискретные моменты времени (например, стохастические, рекурсивные игры), а другую группу составляют игры, в которых управление системой требует непрерывного выбора вариантов действий, – непрерывные игры. Наибольшее прикладное значение и наиболее развитый математический аппарат среди игр последней группы имеют дифференциальные игры.

Матричная игра – это стратегическая парная антагонистическая с нулевой суммой одноходовая игра с конечным числом вариантов действий у каждой из сторон [91].

Общая формализованная постановка задачи матричной игры выглядит следующим образом. Имеются две стороны  $A$  и  $B$ . Сторона  $A$  имеет  $m$  вариантов действий, а сторона  $B$  располагает  $n$  вариантами. Известны показатели эффективности  $u_{ij}$  ( $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$ ) действий стороны  $A$  (ее «выигрыши»), если она выберет вариант  $A_i$ , а сторона  $B$  – вариант  $B_j$ . При этом параметр  $u_{ij}$  одновременно является показателем невыполнения задачи стороной  $B$  (ее «проигрышем»). Сторона  $A$  считается выигрывающей, а сторона  $B$  – проигрывающей.

Следует обратить внимание на важное обстоятельство: стороне  $A$  точно известны весь набор возможных вариантов действий стороны  $B$  и выигрыши  $u_{ij}$

для каждой из пар вариантов действий  $(A_i, B_j)$ . Точно также стороне  $B$  точно известны весь набор возможных вариантов действий стороны  $A$  и свои проигрыши  $u_{ij}$ . При этом противники измеряют выигрыши и проигрыши одной мерой. Кроме того, каждый из противников хорошо знает о степени осведомленности противоборствующей стороны. Неизвестно же каждому из противников («игроков») только одно: какой именно вариант из числа известных выберет другая сторона. Однако известен принцип, по которому обе стороны выбирают оптимальный вариант действий.

В теории игр вместо понятия «вариант действий» существует другое, более широкое, понятие – стратегия. Стратегией стороны называется совокупность правил, определяющих выбор этой стороной варианта действий при каждом личном ходе в зависимости от сложившейся ситуации.

### 5.2.2. Матричная антагонистическая игра слежения-отрыва

Рассмотрим следующий *пример*. Подводная лодка (сторона  $A$ ) должна осуществлять слежение за корабельным соединением противника (сторона  $B$ ) с целью обеспечения наведения на него ударных сил. Возможны две позиции слежения и два способа передачи подводной лодкой донесений на командный пункт. Корабельное соединение на переходе может осуществлять «профилактические» мероприятия для отрыва от слежения. Предполагаются два способа отрыва. Подводная лодка способна определить факт попытки противника оторваться от слежения и может применить один из трех способов восстановить (удержать) контакт. Ни один из противников, осуществляя выбор способа действий, не знает о выборе противника.

Математическое моделирование должно позволить обосновать позицию слежения подводной лодки, способы передачи ею донесения, способ восстановления контакта, а также прогнозировать способ отрыва противника от слежения.

В данном случае имеет место многоходовая игра. Показателем эффективности действий подводной лодки является вероятность наведения на противника своих ударных сил. Эффективность мероприятий противника по отрыву от слежения должна оцениваться вероятностью срыва этого наведения.

Разобьем процесс определения сторонами способов действий на следующие ходы:

- первый ход стороны *A* – выбор позиции слежения и способа передачи донесений;
- первый ход стороны *B* – выбор способа отрыва от возможного слежения противника;
- второй ход стороны *A* – выбор способа восстановления контакта.

Вариантами действий стороны *A* на первом ходе являются:

- $a'_1$  – осуществлять слежение в позиции № 1, а передачу донесений – первым способом;
- $a'_2$  – осуществлять слежение в позиции № 1, а передачу донесений – вторым способом;
- $a'_3$  – осуществлять слежение в позиции № 2, а передачу донесений – первым способом;
- $a'_4$  – осуществлять слежение в позиции № 2, а передачу донесений – вторым способом.

Следующий ход делает сторона *B*. Вариантами ее действий являются отрыв от возможного слежения первым или вторым способом (обозначим эти варианты соответственно через  $b_1$  и  $b_2$ ).

Затем свой второй ход делает сторона *A*. Она выбирает один из трех возможных способов восстановления контакта. Обозначим их  $a''_1, a''_2, a''_3$ .

Многоходовую игру можно представить в виде дерева игры (рис. 5.2.1). На этом дереве окружностями с помещенными внутри символами *A* или *B* обозначено, какая именно сторона делает выбор на данном ходе, а отрезками с помещенными рядом символами  $a'_i, a''_i, b_j$  обозначены конкурирующие на данном ходе варианты.

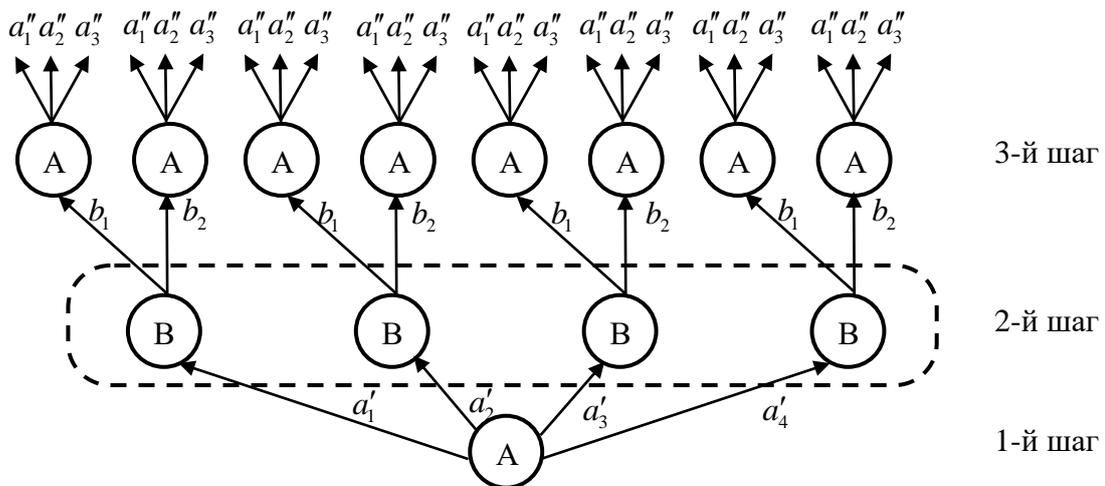


Рис. 5.2.1. Дерево многоходовой игры

Иначе говоря, стратегия – это один обобщенный выбор. Так, в условиях рассматриваемого примера стратегиями стороны  $A$  будет выбор на первом и втором ходах соответственно вариантов:

$$\begin{array}{ll} A_1 - a'_1 \text{ и } a''_1, & A_7 - a'_3 \text{ и } a''_1, \\ A_2 - a'_1 \text{ и } a''_2, & A_8 - a'_3 \text{ и } a''_2, \\ A_3 - a'_1 \text{ и } a''_3, & A_9 - a'_3 \text{ и } a''_3, \\ A_4 - a'_2 \text{ и } a''_1, & A_{10} - a'_4 \text{ и } a''_1, \\ A_5 - a'_2 \text{ и } a''_2, & A_{11} - a'_4 \text{ и } a''_2, \\ A_6 - a'_2 \text{ и } a''_3, & A_{12} - a'_4 \text{ и } a''_3. \end{array}$$

Стратегиями стороны  $B$  будут:

$$\begin{array}{l} B_1 - \text{выбирать вариант действий } b_1; \\ B_2 - \text{выбирать вариант действий } b_2. \end{array}$$

Таким образом, многоходовая игра сведена к одноходовой (всякая многоходовая игра с конечным числом ходов может быть сведена к одноходовой игре). При этом для стороны  $B$ , имеющей один ход, понятия «стратегия» и «вариант действий» совпадают (с точки зрения терминологии теории игр).

Ранее предполагалось, что ни одна из сторон не знает выбора другой стороны. Допустим теперь, что стороне  $B$  известен выбор стороны  $A$  позиции слежения. Иначе говоря, сторона  $B$  теперь знает, какая пара вариантов действий стороны  $A$  имеет место:  $a'_1, a'_2$  или же  $a'_3, a'_4$ .

Предположим, что в условиях такой осведомленности сторона  $B$  по-прежнему делает выбор между вариантами действий  $b_1$  и  $b_2$ , однако число стратегий стороны  $B$ , подлежащих теперь рассмотрению, изменится.

Приведем эти стратегии:

$B_1$  – придерживаться варианта действий  $b_1$  при любой паре вариантов действий стороны  $A$  ( $a'_1, a'_2$  или  $a'_3, a'_4$ );

$B_2$  – придерживаться варианта действий  $b_1$ , если известно, что сторона  $A$  использует один из вариантов пары  $a'_1, a'_2$ ; придерживаться варианта действий  $b_2$ , если известно, что сторона  $A$  использует один из вариантов пары  $a'_3, a'_4$ ;

$B_3$  – придерживаться варианта действий  $b_2$  при любой паре вариантов действий стороны  $A$ ;

$B_4$  – придерживаться варианта действий  $b_2$ , если известно, что сторона  $A$  использует один из вариантов пары  $a'_1, a'_2$ ; придерживаться варианта действий  $b_1$ , если известно, что сторона  $A$  использует один из вариантов пары  $a'_3, a'_4$ .

Таким образом, число стратегий стороны  $B$  увеличилось вдвое. Вообще, с увеличением информации о выборе противника число стратегий другой стороны возрастает. При этом, увеличение информации о выборе, сделанном противником, способствует увеличению выигрыша (уменьшению проигрыша) у стороны, получившей информацию (как это и имеет место на практике).

Дерево описанной выше игры показано на рисунке 5.2.2. В отличие от рисунка 5.2.1 на нем пунктиром обведены не сразу все окружности, в которые ведут стрелки, соответствующие вариантам действий  $a'_1, a'_2, a'_3, a'_4$ , а две пары окружностей. Пунктирной линией принято объединять в одну группу те варианты действий, которые другой стороне невозможно классифицировать.

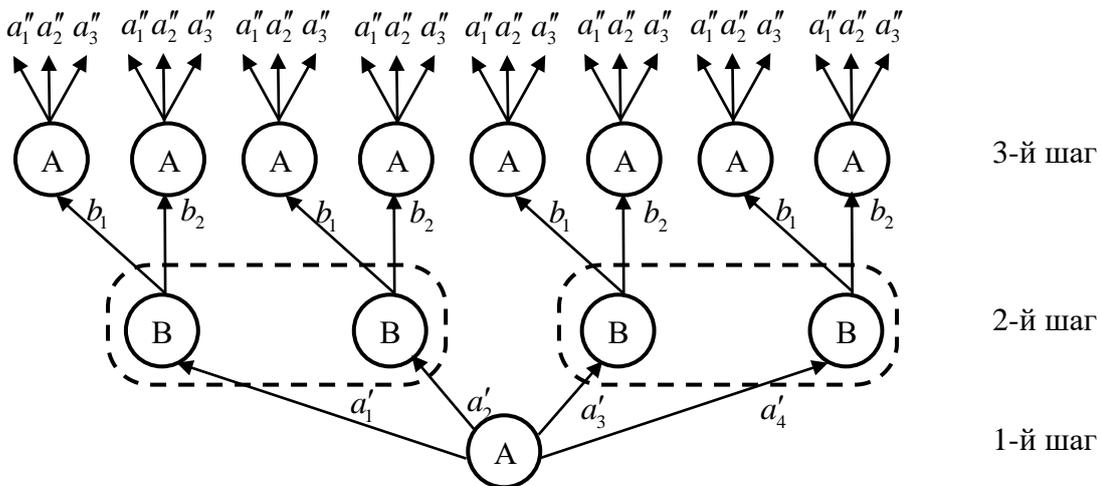


Рис. 5.2.2. Уточненное дерево многоходовой игры

В том случае, когда игроку точно известна избранная противником стратегия, игровая задача для него превращается в задачу оптимизации в условиях полного знания обстановки.

Исчерпывающую информацию о матричной игре дает матрица игры, или платежная матрица:

|       |          |          |     |          |     |          |
|-------|----------|----------|-----|----------|-----|----------|
|       | $B_1$    | $B_2$    | ... | $B_j$    | ... | $B_n$    |
| $A_1$ | $u_{11}$ | $u_{12}$ | ... | $u_{1j}$ | ... | $u_{1n}$ |
| $A_2$ | $u_{21}$ | $u_{22}$ | ... | $u_{2j}$ | ... | $u_{2n}$ |
| ...   | ...      | ...      | ... | ...      | ... | ...      |
| $A_i$ | $u_{i1}$ | $u_{i2}$ | ... | $u_{ij}$ | ... | $u_{in}$ |
| ...   | ...      | ...      | ... | ...      | ... | ...      |
| $A_m$ | $u_{m1}$ | $u_{m2}$ | ... | $u_{mj}$ | ... | $u_{mn}$ |

Элементами этой матрицы являются выигрыши стороны  $A$  (проигрыш стороны  $B$ ) при соответствующей паре стратегий противников. Например,

элемент матрицы  $u_{ij}$  есть выигрыш стороны  $A$  (проигрыш стороны  $B$ ), если сторона  $A$  избрала стратегию  $A_i$ , а сторона  $B$  – стратегию  $B_j$ .

При этом, любому из противников можно приписывать символы  $A$  или  $B$ . Важно только, чтобы элементы матрицы  $u_{ij}$  являлись показателями эффективности выигрывающей стороны.

В результате решения игры определяются оптимальные стратегии сторон и цена игры – средний выигрыш стороны  $A$  (средний проигрыш стороны  $B$ ) при применении противниками своих оптимальных стратегий. В общем случае оптимальными являются смешанные стратегии сторон (см. [74; 139; 375]).

Помимо указанных выше, существуют бесконечные игры. Бесконечными играми называют стратегические парные антагонистические одноходовые игры с бесконечным числом вариантов действий (стратегий) хотя бы у одного из игроков, то есть с выбором им (ими) значения непрерывного параметра (глубины погружения подводной лодки, углубления мин, дистанции залпа и т. д.). При этом, естественно, каждый из противников, принимая решение, должен учитывать действия другой стороны.

### 5.2.3. Стохастические и дифференциальные игры

Другим примером являются *стохастические игры*. Стохастическая игра – это стратегическая парная антагонистическая многоходовая игра с конечным числом стратегий у каждой стороны. Помимо отсутствия ограничения на число ходов эта игра имеет также следующие особенности:

- сторона  $A$  получает определенный выигрыш на каждом ходе игры;
- на каждом ходе с некоторой вероятностью, отличной от нуля, игра может закончиться.

Процессы, описываемые методами стохастических игр, являются своеобразным сочетанием дискретных цепей Маркова и конфликтных ситуаций. Вот общее формализованное описание задачи. Имеется система, которая в дискретные моменты времени может с некоторой известной вероятностью переходить в одно из  $N$  состояний. Процесс переходов системы в различные состояния – Марковский, то есть будущее состояние системы зависит только от состояния системы на данный момент времени и не зависит от того, как именно система пришла в это состояние.

*Рекурсивные игры* отличаются от стохастических двумя особенностями:

- свой выигрыш сторона  $A$  получает только в том случае, если процесс заканчивается;

– вероятность прекращения игры может быть равна нулю, т. е. возможны состояния системы и пары стратегий сторон, при которых переход системы в поглощающие состояния невозможен.

*Квазиматричные игры* используются для моделирования многошаговых конфликтных ситуаций двух сторон ( $A$  и  $B$ ) со случайным ходом у одной из них и антагонистическими интересами.

*Дифференциальные игры* в определенном смысле являются аналогом рекурсивных игр. Разница заключается в следующем. Рекурсивные игры есть модели марковских случайных процессов со счетным и конечным числом состояний и дискретным временем переходов системы; дифференциальные игры описывают марковский случайный процесс с бесконечным числом состояний системы и непрерывным временем переходов. В каждый момент времени этого процесса разыгрывается бесконечная игра: каждый из двух противников выбирает значения некоторых параметров из замкнутых их множеств. На выбор параметров накладывается ограничение: они должны давать единственное решение системы дифференциальных уравнений, описывающих случайный процесс. При этом результат игры может интерпретироваться как некоторая траектория.

Обычно считается, что игра заканчивается с выходом траектории на некоторую заданную границу, при этом сторона  $A$  получает выигрыш. Впрочем, может быть определен выигрыш и в случае, если траектория бесконечное время не выходит на заданную границу.

Решение игры составляют оптимальные стратегии сторон и цена игры. Оптимальной называется стратегия, которая при большом числе повторений партий игры гарантирует участнику максимально возможный средний выигрыш (минимально возможный средний проигрыш).

Решение игры, вообще говоря, может быть различным в зависимости от принципов подхода к его отысканию. В теории игр для поиска решения используется принцип минимакса.

Если участник конфликта следует принципу минимакса, то, оценивая целесообразность применения каждой из своих стратегий, он исходит из возможности наиболее неблагоприятного для себя ответного хода противника. Выбранная им стратегия гарантирует ему максимально возможный выигрыш (или минимально возможный проигрыш) при самой неблагоприятной для него стратегии противника.

### 5.3. Модели противодействия торпедному оружию

Анализ зарубежных программ создания новейших систем оружия, развития современных концепций применения, направленности боевой подготовки их вооружённых сил, позволяет сделать вывод, что в США и странах западной коалиции проводится активная плановая подготовка вооружённых сил к ведению войн нового поколения против Российской Федерации.

Боевые действия Объединённых вооружённых сил планируются в единой информационной сети, с широким применением информационных технологий и сетевых методов ведения войны [316]. Основу единой информационной сети составляют быстро развёртываемые системы освещения воздушной, наземной, надводной и подводной обстановки космического, воздушного и морского базирования, объединённые с системами навигации и связи.

#### 5.3.1. Противодействие торпедному оружию

Торпедное оружие до настоящего времени остается основным средством как для борьбы с надводными кораблями и подводными лодками, так и средством борьбы самих подводных лодок против надводных кораблей и подводных лодок вероятного противника.

Несмотря на активные исследования в области создания и применения противоторпедной защиты (ПТЗ), включающей ГПД и антиторпедную защиту, до настоящего времени в спектре мнений известных зарубежных специалистов не видно мнения о действительно высокоэффективной системе ПТЗ. Кроме того, постоянное расширение возможностей систем наведения торпед снижает эффективность применения средств ПТЗ, что обуславливает необходимость их совершенствования.

На основании вышеизложенного, для защиты МПО от торпедного оружия целесообразно исключить поступление в СИУ ТО информации о среде функционирования, тем самым блокировав возможности поиска, распознавания и выбора целей с наведением автономного торпедного оружия. Для этого предлагается существенно увеличить уровень акустической помехи в диапазоне действия гидроакустической станции (ГАС) обнаружителя (при телеуправлении) и системы автономного самонаведения торпедного оружия.

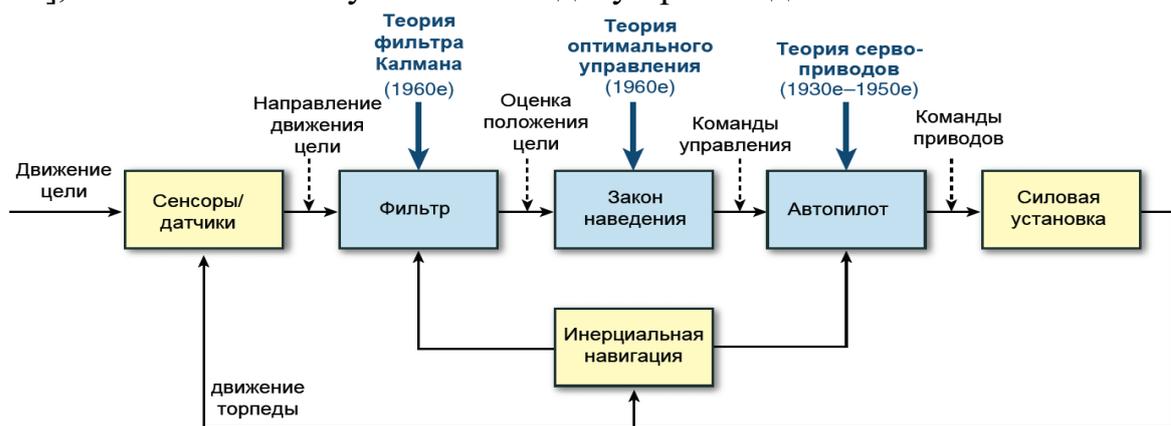
К средствам ГПД, создающим искусственные помехи, относятся устройства, которые организуют заградительную или прицельную помеху с целью затруднить прием СИУ автономного торпедного оружия или ГАС обнаружителя от МПО первичного или вторичного сигнала, а также специальные имитаторы, называемые ложными целями, источник шумов которых удаляется в сторону от защищаемого объекта, уводя торпеды в сторону от него.

Поэтому предлагается использовать моделирование для имитации работы множественных источников широкополосных шумов высокой интенсивности, действующих в различных точках пространства в течении заданного времени и создающие возможность защищаемому объекту совершить маневр уклонения. Подобные источники являются мехатронными устройствами, способными двигаться в водной среде и создавать широкополосную помеху заданной интенсивности. Совместное применение мехатронных устройств для защиты МПО (цели) определяет суть задачи управления. Эти задачи относятся к задачам планирования автономных групповых миссий управляемых источников помех с оптимизацией траектории уклонения цели.

### ***5.3.2. Задача группового управления***

Классические законы наведения, наиболее ярким примером которых является пропорциональная навигация (ПН), демонстрировали свою эффективность в алгоритмах наведения на цель вплоть до начала 1970-х годов. Однако к середине 1970-х годов возможности бортовых вычислителей подводных лодок по прогнозированию траекторий атакующего торпедного оружия показали, что оружие с ПН-наведением может быть неэффективным против них. К тому времени применение теории оптимального управления к задачам наведения уже было достаточно развито, что позволило предложить новые и потенциально более перспективные проекты законов наведения, используемые в интеллектуальных ССН. Примерно в это время вычислительная мощность, необходимая для реализации таких передовых алгоритмов, была уже вполне достаточной для того, чтобы сделать их применение практичным. Большинство современных законов управления выведены с использованием линейно-квадратичной (LQ) теории оптимального управления для получения аналитических решений с обратной связью. Многие из современных формализаций учитывают маневр цели, что позволяет иметь дело со сценариями, учитывающими высокую маневренность цели

(особенно это касается задач терминального наведения). Доступность информации об ускорении цели для закона наведения варьируется в зависимости от возможностей и типа датчика наведения и конкретной формулировки закона наведения. Как правило, в современных формулировках делается явное предположение о динамических характеристиках цели, торпеды и возможностях автопилота. Оказывается, что ПН является оптимальным законом наведения в отсутствие временной задержки в автопилоте (и при некоторых других предполагаемых условиях). Характер обратной связи закона наведения при самонаведении позволяет торпедой корректировать неточные прогнозы маневра цели и другой немодулированной динамике (как показано на рисунке 5.3.1). Отметим, что требование повышения производительности продолжает стимулировать разработчиков оптимальных законов наведения, частично заставляя учитывать (включать) более подробную динамику перехватчиков и его целей [431; 453; 459; 530; 550; 551], что значительно усложняет задачу противодействия ССН ТО.



*Рис. 5.3.1. Традиционная топология наведения, навигации и управления для управляемой торпеды (включает фильтр наведения, закон наведения, автопилот и компоненты инерциальной навигации)*

Для обеспечения эффективного противодействия ССН торпед, и особенно при залпе, необходимы согласованные действия мехатронных систем ГПД (агентов). При этом следует иметь в виду, что централизованное управление системами ГПД по акустическому каналу практически невозможно вследствие высокого уровня помехи, формируемой сами системами ГПД. Оптический канал имеет весьма малый радиус действия и неприемлем для координации действия систем ГПД на удалении сотни метров. Для такой системы не может быть централизованного органа (лидера) управления поведением каждого агента. При этом, локальные и, в достаточной степени, случайные взаимодействия устройств ГПД должны привести к

возникновению «квазиинтеллектуального» глобального поведения всей системы противодействия торпедному оружию.

Задача совместного использования мехатронных систем для организации эффективного противодействия скоординированному действию торпед противника относится к области науки «Задачи в условиях противодействия и неполноты информации (PP/TP, PP – path planning; TP – trajectory planning) [99; 100]. Решение этой задачи должно привести к созданию методов и алгоритмов совместного применения мехатронных устройств и поиска их оптимальных траекторий при противодействии одиночному или скоординированному действию торпед противника.

В общем случае задачи в условиях противодействия и неполноты информации решаются методами:

1. Планирования миссий управляемых объектов, в том числе и групповых.

2. Дифференциальные игры, в том числе с ложной целью и MTD (missile-target-defender).

При этом критериями задач в различных постановках выступают:

- ресурсные критерии;
- вероятностные критерии;
- информационные критерии;
- временной критерий;
- точностные критерии;
- гибридные критерии;
- многокритериальная оптимизация.

Перейдем к математической формализации проблемы. Будем считать, что ставится задача противодействия одиночной торпедой. Известный алгоритм ССН торпеды позволяет оценивать направление ее движения при наличии искусственных помех. Пусть решающее правило определяет положение цели  $\hat{r}(t)$  при ее реальном нахождении в точке  $r(t)$  в некоторой декартовой системе координат. Текущие положения мехатронных устройств будем задавать векторами  $r_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, N$ , где  $N$  – количество мехатронных устройств, а положение торпеды – вектором  $r_0(t)$ . Тогда решающее правило будет иметь вид

$$\hat{r}(t) = \Phi(r(t), r_0(t), r_1(t), \dots, r_N(t)). \quad (5.3.1)$$

Для описания движения цели и мехатронных устройств можно использовать упрощенные модели динамики этих объектов, считая, что:

$$\dot{r}(t) = \phi(r(t), r_0(t), r_1(t), \dots, r_N(t), u(t)), \quad (5.3.2)$$

$$\dot{r}_i(t) = u_i(t), \quad (5.3.3)$$

где  $u(t)$ ,  $u_i(t)$  – управления цели и мехатронных устройств соответственно.

При реализации догонной траектории торпеда управляется по закону

$$r_0(t) = v_0 \frac{\hat{r} - r_0}{|\hat{r} - r_0|}, \quad (5.3.4)$$

где  $v_0$  – скорость торпеды.

Терминальным критерием задачи является расстояние между целью и торпедой в заданный момент времени  $T$ , а именно

$$R[u, u_1, \dots, u_N] = |r(T) - r_0(T)|. \quad (5.3.5)$$

Задача оптимизации заключается в

$$\max_{u, u_1, \dots, u_N} R[u, u_1, \dots, u_N] \quad (5.3.6)$$

при динамических ограничениях (5.3.1)–(5.3.4).

Данная задача может быть решена методами оптимального управления, например, при условии, что уравнение (5.3.1) является алгебраическим. На основании наблюдений вырабатываются команды по параметрам генерации электровзрывов и режимам движения каждой мехатронной системой гидроакустического противодействия. По сути, это одноранговая самоорганизующаяся сеть, характерной особенностью которой является способность агентов к коллективному поведению при решении общей целевой задачи и взаимодействующих между собой для решения этой задачи. Приведенная общая модель может быть использована в имитационном моделировании после конкретизации динамики системы, способов наблюдения и правил управления. Имитационное моделирование позволяет сравнивать разные способы управления носителем и источниками широкополосных помех при заданном управлении торпедным оружием и выбирать наиболее приемлемые сценарии поведения в задаче противодействия этому оружию. Другие задачи требуют дополнительных исследований и разработки методов их решения. В виду высокой сложности задачи рассчитывать на получение аналитического решения не приходится. Однако можно конкретизировать классы функций, внутри которых происходит поиск управлений и с помощью имитационного моделирования и поиска экстремума на вещественных пространствах найти некоторые субоптимальные решения.

Другое допустимое упрощение – рассмотреть дискретизацию исходной задачи. Вместо непрерывных функций, определенных на континууме значений времени  $t$ , рассмотрим значения всех определенных ранее функций в моменты времени  $\{t_i\}$ ,  $i = 0, 1, \dots, K$ , которые, например, могут быть выбраны

из множества моментов, в которых производятся измерения. Тогда дифференциальные уравнения заменятся на конечноразностные, а задача оптимизации любого из функционалов станет задачей конечномерной оптимизации, для решения которых разработано большое количество методов. Если временные промежутки  $t_i - t_{i-1}$ ,  $i = 1, \dots, K$ , невелики можно считать, что каждый из объектов движется по отрезку прямой при  $t \in [t_{i-1}, t_i]$ ,  $i = 1, \dots, K$ . В таком случае траектории движения объектов будут представлять из себя  $K$ -звенные ломаные, а вычисления, возникающие при применении методов оптимизации, могут быть произведены аналитически, и задача оптимизации может быть сведена к решению серии систем линейных алгебраических уравнений, что позволяет надеяться на ускорение вычислений, поскольку это важно в связи с ограниченностью энергоресурсов рассматриваемых объектов и времени на принятие решения.

### 5.3.3. Пример сценария применения

В данном сценарии рассматривается случай атаки одиночной торпеды на носитель, который движется под углом к оси  $X$ . В задаче перехвата важно соотношение скоростей рассматриваемых объектов. Скорость торпеды (Атакующего)  $v_A$  выше скорости носителя (Цели)  $v_T$  и скорости автономных источников шумов (Защитников)  $v_D$ , тогда как скорость носителя выше скорости Защитника:

$$\begin{cases} v_D = 5 \frac{\text{М}}{\text{с}}, \\ v_T = 10 \frac{\text{М}}{\text{с}}, \\ v_A = 15 \frac{\text{М}}{\text{с}}. \end{cases}$$

Система самонаведения (СН) торпеды реагирует на первичное акустическое поле объектов, и в начале атаки во всех сценариях сосредоточена на шуме носителя. Рассматривается моделирование для простейших физических моделей распространения сигналов в среде и динамических моделей движения подводных объектов, которое тем не менее даёт понять перспективность предлагаемого подхода и тактик применения устройств.

Гидроакустический сигнал, излучаемый носителем, считается постоянным и равным 60 Дб. Сигнал, непрерывно излучаемый Защитником, представляет собой гидроакустические импульсы с постоянным периодом 2 секунды, интенсивность которых меняется по экспоненциальному закону за

эти 2 секунды от 100 до 20 Дб. Зависимость такого сигнала от времени приведена на рис. 5.3.2.

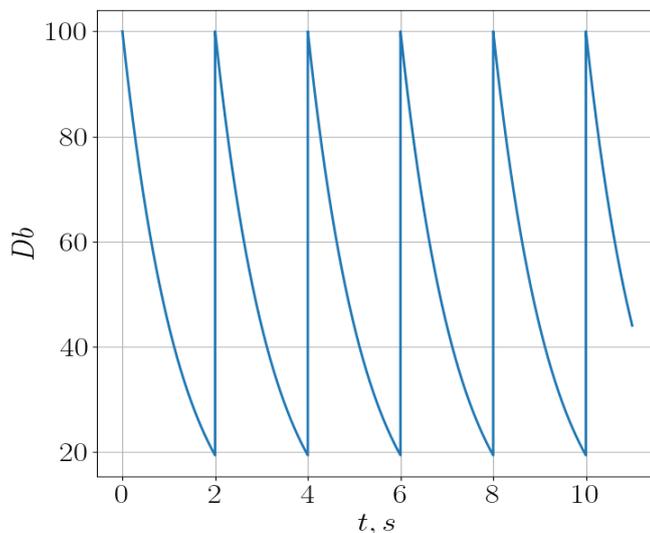
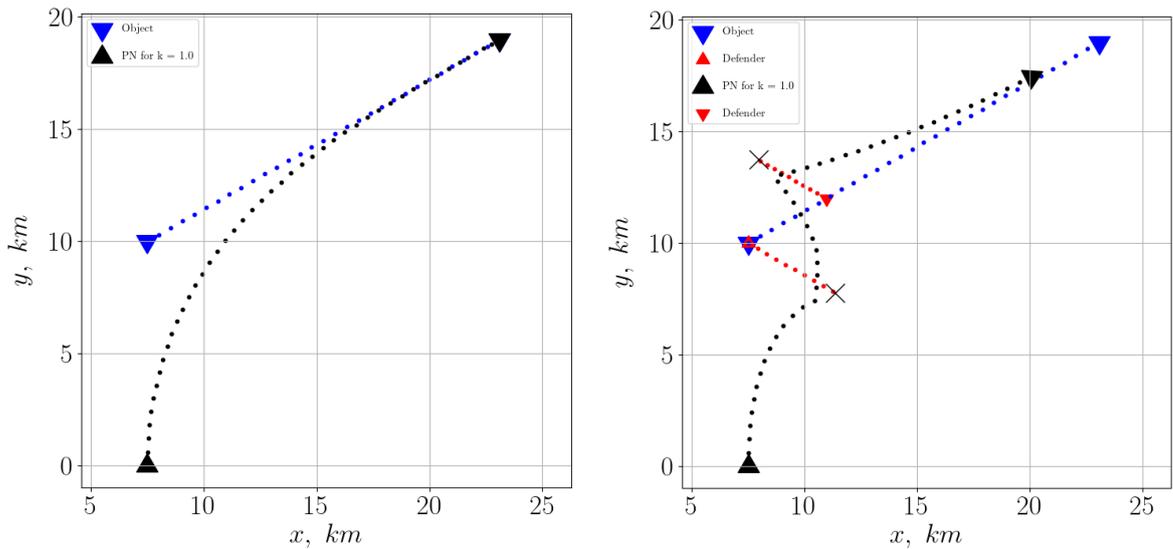


Рис. 5.3.2. Зависимость излучаемого Защитником шума от времени

Считаем, что в среде сигналы затухают обратно пропорционально квадрату расстояния. Предлагаемая тактика защиты состоит в запуске носителем двух устройств в разные моменты времени, которые должны обмануть ССН торпеды, тем самым дав возможность носителю избежать атаки и покинуть район действия средств. Начальное расстояние между торпедой и носителем равно  $S_0 = 10$  км. Полное время моделирования  $T = 30$  минут, что соответствует запасу топлива торпеды.

Результаты моделирования приведены на рис. 5.3.3. На графике слева показан случай в отсутствии устройств защиты, а справа – с ними. Видно, что наличие защитников позволяет носителю избежать уничтожения. Выбором моментов запуска и направления движения мехатронных устройств можно добиться и лучшего результата, решая задачу оптимизации, поставленную ранее.

Таким образом, на основе моделирования может быть предложен подход к организации противодействия торпедному оружию вероятного противника на основе совместного применения мехатронных устройств, использующих явление электровзрыва для противодействия ССН торпедного оружия и решающих групповую задачу управления с целью защиты МПО от поражения. Приведенный класс задач предполагает использование атакуемым мехатронных устройств, играющих роль мобильных защитников, в качестве которых может выступать как самоходный источник помех, отвлекающий на себя атакующий объект (ракету или торпеду), путем его перехвата, так и ударный робототехнический комплекс, направленный на уничтожение опасного объекта.



▲ – основной объект, ▲ – атакующий, ▲ – защитник

Рис. 5.3.3. Траектории движения объектов

Характерной особенностью рассмотренных задач является неполнота априорной информации о дистанции до атакующего объекта и возможность мгновенного использования активных средств. Показано, что наличие даже только второго защитника целесообразно, так как значительно увеличивает время перехвата по сравнению со случаем лишь одного защитника. Также дополнительный защитник увеличивает вероятность выбора для промежуточного преследования именно одного из защитников вместо основной цели. При заданных в рассмотренных моделях условиях по стартовым позициям, скоростям и запасу хода в случае реального отвлечения торпеды на защитников, при следовании построенным схемам выпуска защитников торпедой не хватит запаса топлива на поражение основной цели [70].

## 5.4. Модели поиска и обнаружения морских подводных объектов

В процессе планирования и выполнения основной миссии каждый управляемый объект зачастую должен решать ряд вспомогательных задач, связанных, в частности, с топопривязкой и определением текущих координат и элементов движения противодействующих объектов, построением безопасной (в определенном смысле) траектории своего движения и т.п. Отдельного рассмотрения заслуживают задачи, в которых для дезинформации

и отвлечения сил и средств конфликтующих сторон управляемый объект имеет возможность использовать мобильную ложную цель. При выполнении автономных миссий БПЛА или автономными необитаемыми подводными аппаратами (АНПА) часто ставится задача слежения по угломерной информации за мобильной целью. Однако точность оценки элементов движения цели (ЭДЦ) существенным образом зависит от траектории, по которой движется наблюдатель в процессе слежения, что связано с проблемой наблюдаемости цели. В связи с этим естественно возникает задача построения в реальном времени рациональной (с точки зрения улучшения точности оценивания ЭДЦ) траектории движения БПЛА или АНПА. Иными словами – задача траекторного управления наблюдениями с борта подвижного наблюдателя. Собственно процесс слежения состоит из двух связанных между собой процессов: процесса сбора информации о цели и процесса обработки этой информации. Управление процессом сбора информации называют *управлением наблюдениями*, а процесс ее обработки – *фильтрацией*. Сложность построения оптимальных процедур сбора и обработки информации в режиме реального времени напрямую связана с нелинейностью как уравнений движения системы наблюдатель-цель, так и уравнений, описывающих угловые наблюдения (пеленг на цель и угол ее возвышения). В силу габаритных и энергетических ограничений, бортовые вычислители на БПЛА или АНПА относительно малопродуктивны, что требует достаточно простых (рекуррентных) алгоритмов фильтрации, построенных, например, на базе расширенного фильтра Калмана. «Простота» подобных алгоритмов и, в частности, ошибки линеаризации компенсируются более качественной информацией о цели, получаемой за счет оптимизации процесса наблюдения. Численные эксперименты показывают, что линеаризованный фильтр Калмана с управляемым процессом траекторного наблюдения дает оценки ЭДЦ не хуже, а иногда и лучше сложных нелинейных алгоритмов фильтрации при интуитивно разумном, но неоптимальном движении наблюдателя.

Алгоритмы системы поддержки принятия решений для управляемых человеком объектов, автоматизации выбора миссии, а также планирования маршрутов движения беспилотных средств должны наиболее полно учитывать и наилучшим образом обрабатывать информацию, приходящую по всем каналам от различных физических полей с учетом динамических и структурных ограничений, накладываемых внешней средой и другими.

В настоящем разделе представлено развитие методов планирования маршрутов и предложены новые постановки задач оптимизации как задачи управления подвижными объектами (ПО) в конфликтной среде [100]. Под *конфликтной средой* понимается совокупность объектов (они называются

конфликтующими), сближение с которыми для управляемого ПО нежелательно в ходе выполнения им основной задачи. Целью управления ПО при движении его в конфликтной среде является минимизация негативного воздействия конфликтующих объектов на управляемый объект путем выбора маршрута и параметров движения последнего. К числу негативных воздействий принято относить обнаружение объекта. Постановки задач планирования маршрута отличаются предположениями о характеристиках информационных полей, в которых происходит обнаружение, классами допустимых законов управления, видом критериев качества, количеством обнаружителей, объемом и характером информации, доступной конфликтующим сторонам (см. [66; 91; 93; 120; 172; 208; 297; 328] и библиографию к указанным статьям).

Совокупность конфликтующих объектов формирует карту угроз для ПО, которая должна учитываться при построении закона уклонения от обнаружения. Для описания механизмов обнаружения в литературе наиболее часто используются два подхода.

Первый подход состоит в оценке интегрального уровня сигнала, излученного ПО и поступившего на вход относительно большой информационно-наблюдательной системы за все время наблюдения. В литературе такую систему принято называть *сенсором*.

Оценка интегрального уровня сигнала на входе сенсора определяется с учетом решения задачи об оптимизации закона управления ПО, перемещающимся в течение промежутка времени  $T$  по маршруту из начальной точки  $A(x_A, y_A)$  в конечную точку  $B(x_B, y_B)$  и уклоняющимся при этом от обнаружения сенсором (группой сенсоров), расположенных в районе. Интегральный уровень сигнала получил название *энергетического риска*.

Второй подход к описанию механизма обнаружения состоит в том, что наблюдатель отождествляется с точечным объектом, снабженным круговой зоной обнаружения фиксированного радиуса, центр которой совпадает с текущей позицией наблюдателя. В литературе такой наблюдатель принято называть информационным детектором (или просто *детектором*). В простейшем случае предполагается, что цели, попавшие внутрь круга, обнаруживаются мгновенно и достоверно; цели, не попавшие в круг, – не обнаруживаются. Детектор является устройством, производящим обнаружение вторичного поля ПО. Указанный подход описан, например, в [4; 98].

Помимо сенсоров и детекторов авторами рассматриваются маневренные средства. Основным критерием в задачах уклонения объекта от обнаружения является вероятность обнаружения, т. е. вероятность обнаружения хотя бы один раз и хотя бы одним наблюдателем за время движения объекта по

маршруту. Оптимизация сводится к нахождению траектории и закона изменения скорости объекта, доставляющих минимум указанному критерию

$$P_{\text{обн}} = 1 - (1 - P_{\text{стац}})(1 - P_{\text{ман}}),$$

где  $P_{\text{обн}}, P_{\text{стац}}, P_{\text{ман}}$  – вероятности обнаружения ПО всей системой средств, системой стационарных средств и маневренными средствами, соответственно.

#### 5.4.1. Вероятностный поиск

Будем рассматривать частный случай (хотя и общий случай описывается подобным образом), когда все сенсоры имеют одинаковые характеристики, используются одинаковые алгоритмы обработки информации и осуществляется прием в одних и тех же помеховых условиях, оптимизация закона уклонения ПО от обнаружения системой из  $N$  сенсоров, расположенных по координатам  $(a_i, b_i)$ , и движущегося по траектории  $(x(t), y(t))$  с параметрами среды  $m$  и  $k$ , сводится к решению вариационной задачи о минимизации функционала (риска) (ср. с (4.4.1))

$$R = \int_0^T \sum_{i=1}^N \frac{\left(\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}\right)^m}{\left(\sqrt{(x(t) - a_i)^2 + (y(t) - b_i)^2}\right)^k} dt \rightarrow \min_{(x, y, x, y)}. \quad (5.4.1)$$

Вариационная задача (5.4.1), имеет следующую физическую интерпретацию. Подынтегральное выражение в (5.4.1) пропорционально мгновенному уровню интенсивности сигнала, излученного объектом, прошедшего через среду распространения и принятого системой сенсоров. Критерий (5.4.1) получил название *энергетического риска*. Таким образом, при малых отношениях сигнал/помеха минимизация вероятности обнаружения сводится к минимизации энергетического риска.

При построении математической модели обнаружения ПО маневренными силами и средствами считаются известными расположение и характеристики района, в котором происходит противодействие сторон, а также предположения о составе сил и средств обнаружения и тактике их применения. Основной характеристикой модели является интенсивность поиска  $\lambda(t)$  – среднее число обнаружений объекта в единицу времени. В предположении о малости величины  $\lambda(t)$  определяется вероятность обнаружения объекта маневренным средством хотя бы один раз за время поиска  $T$  (в литературе [99] эта величина называется просто вероятностью обнаружения)

$$P_{\text{обн}} = 1 - \exp\left(-\int_0^T \gamma(t) dt\right). \quad (5.4.2)$$

Стоящий в круглых скобках интеграл получил название *потенциала поиска*. Конкретное значение потенциала поиска определяется тактико-техническими характеристиками средств обнаружения.

В предположении о том, что все средства обнаружения действуют независимо, в силу (5.4.1) и (5.4.2), получаем следующее выражение для критерия оптимизации закона уклонения ПО от обнаружения всей системой наблюдателей:

$$R = \int_0^T \left( \sum_{i=1}^N \frac{\left(\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}\right)^m}{\left(\sqrt{(x(t) - a_i)^2 + (y(t) - b_i)^2}\right)^k} + \sum_{s=1}^S \chi_s \gamma_s(t) \right) dt,$$

где  $S$  – количество маневренных средств обнаружения,  $\chi_s$  – характеристическая функция, принимающая значение 1 в случае, когда маршрут ПО проходит через район, контролируемый соответствующим маневренным средством, и 0 – в противном случае.

#### 5.4.2. Уклонение подвижных объектов от обнаружения системой наблюдателей (сенсор – маневренное средство)

В работе [100] рассматривается задача построения траектории уклонения ПО на плоскости. Поисковая система состоит из сенсора, расположенного в начале декартовой системы координат, и маневренных поисковых средств. Заданы начальная  $A(x_A, y_A)$  и конечная  $B(x_B, y_B)$  точки маршрута. Вводится полярная система координат, полюс которой совпадает с положением сенсора, а полярная ось проходит через начальную точку маршрута. Полярные координаты произвольной точки плоскости обозначаются символами  $(\rho, \psi)$ . Время движения по маршруту фиксировано и равно  $T$ . Область поиска маневренного средства задается связной областью  $Q$ .

Основной характеристикой модели маневренного средства является интенсивность поиска  $\gamma(t)$  – среднее число обнаружений объекта в районе поиска в единицу времени. Критерий имеет следующий вид:

$$R = \int_0^T (p_1 I + p_2 \chi_Q \gamma(t)) dt,$$

где  $p_1, p_2$  – весовые коэффициенты,  $\chi_Q$  – индикатор множества  $Q$ . Вводится величина  $p = p_2 \gamma(t) / p_1$ . Предполагается, что интенсивность поиска постоянна. Тогда во введенной полярной системе координат задача об оптимизации закона уклонения от обнаружения системой сенсор – маневренное средство сводится к минимизации функционала

$$R = \int_0^T \left( \frac{\dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\psi}^2}{\rho^2} + \chi_Q p \right) dt \rightarrow \min_{(\psi(\cdot), \rho(\cdot))}$$

при наличии граничных условий

$$\rho(0) = \rho_A, \psi(0) = 0, \rho(T) = \rho_B, \psi(T) = \psi_B,$$

где первое слагаемое, стоящее под интегралом, пропорционально интенсивности поиска сенсором, второе слагаемое – интенсивности поиска маневренным средством в заданном районе  $Q$ .

Решение краевой вариационной задачи, если зона действия маневренного поискового средства охватывает всю плоскость, не отличается от решения задачи при отсутствии такого средства, т. е. при  $p = 0$ . Оптимальной траекторией в этом случае является логарифмическая спираль, проходящая через начальную и конечную точку маршрута.

Предполагается, что оптимальная траектория частично проходит внутри области  $Q$ , а именно проходит через точки  $A, C, D, B$ , где точки  $C, D$  лежат на границе области  $Q$ . Также предполагается, что логарифмическая спираль, соединяющая точки  $C, D$ , полностью лежит внутри области  $Q$ . Тогда задача оптимизации траектории заключается в выборе этих точек и времени нахождения на каждом участке траектории.

Рассмотрим сектор – зону действия маневренного средства. Предполагается, что между начальной точкой  $A$  и конечной точкой  $B$  маршрута движения подвижного объекта находится область действия маневренного средства, заданная в виде

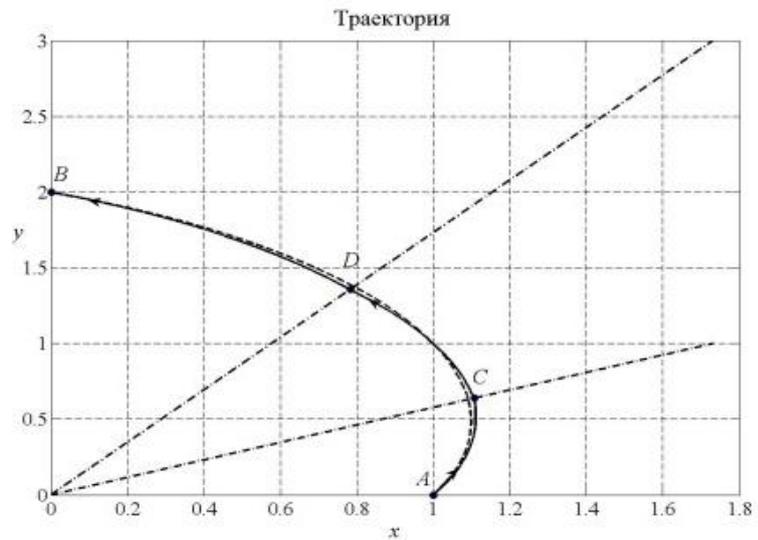
$$Q = \{(\psi, \rho) : \psi \in [\psi_C, \psi_D], \rho \in (0, +\infty)\}.$$

Границей множества  $Q$  являются лучи

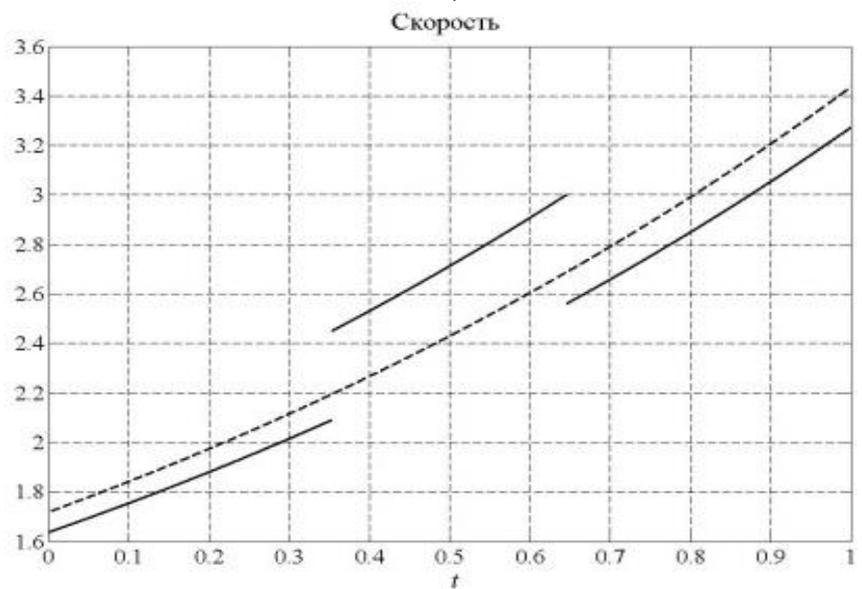
$$Q_C = \{(\psi, \rho) : \psi = \psi_C, \rho \in (0, +\infty)\},$$

$$Q_D = \{(\psi, \rho) : \psi = \psi_D, \rho \in (0, +\infty)\}.$$

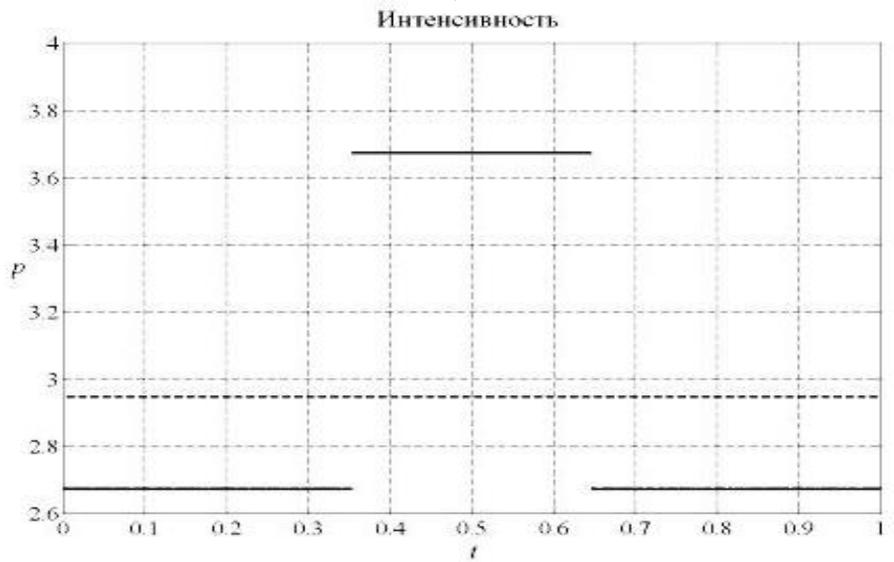
В задаче получено аналитическое решение. В качестве примера приводится решение при следующих начальных условиях:  $\psi_A = 0, \psi_B = \pi/2, \psi_C = \pi/6, \psi_D = \pi/3, \rho_A = 1, \rho_B = 2, T = 1, p = 1$ . Решение задачи иллюстрируется рисунком 5.4.1.



а)



б)



в)

Рис. 5.4.1.  
Графики,  
построенные на  
основе аналити-  
ческого решения  
задачи для поиско-  
вого средства  
вида «сектор»:  
а) траектория,  
б) скорость дви-  
жения подвиж-  
ного объекта,  
в) интенсивность  
поиска

Границы «сектора» показаны штрих-пунктирной линией. Пунктирной линией обозначены траектория и скорость ПО в отсутствии поискового средства. Внутри сектора, границы которого показаны на рисунке пунктирной линией, действует поисковое средство с  $p = 1$ . Точечной линией показаны траектория и скорость ПО в отсутствии поискового средства, сплошной линией показаны оптимальная траектория и оптимальный скоростной режим ПО. Видно, что при заданных условиях задачи траектория меняется незначительно, а скоростной режим является разрывной функцией и существенно отличается от режима в отсутствии поискового средства.

Значение функционала на оптимальной траектории равно  $R = 3,43$ , на оптимальной траектории в отсутствии поискового средства  $R_0 = 2,95$ .

Рассмотрим кольцо – зону действия маневренных средств. Пусть между начальной точкой  $A$  и конечной точкой  $B$  маршрута движения подвижного объекта находится область действия маневренного средства, заданная в виде

$$Q = \{(\psi, \rho) : \psi \in [0, 2\pi], \rho \in (\rho_C, \rho_D)\}.$$

Границей множества  $Q$  являются окружности

$$Q_C = \{(\psi, \rho) : \psi \in [0, 2\pi], \rho = \rho_C\},$$

$$Q_D = \{(\psi, \rho) : \psi \in [0, 2\pi], \rho = \rho_D\}.$$

В задаче получено аналитическое решение. Возьмем те же граничные условия, что и в предыдущем примере,  $\psi_A = 0$ ,  $\psi_B = \pi/2$ ,  $\rho_B = 2$ ,  $T = 1$ ,  $p = 1$ . Решение задачи иллюстрируется на рисунке 5.4.2. Значение функционала на оптимальной траектории  $R = 3,24$ .

Внутри кольца, границы которого показаны на рисунке пунктирной линией, действует поисковое средство с  $p = 1$ . Точечной линией показаны траектория и скорость ПО в отсутствие поискового средства, сплошной линией показаны оптимальная траектория и оптимальный скоростной режим ПО. Видно, что при заданных условиях задачи ПО его скоростной режим является разрывной функцией и сильно отличается от режима в отсутствии поискового средства.

В предположении о том, что противник использует для обнаружения лишь алгоритмы первичной обработки наблюдаемых сигналов было проведено моделирование и получены решения задач оптимизации законов уклонения ПО от обнаружения однородными и/или разнородными наблюдателями. Представляется, что те же подходы могут быть использованы при решении задачи оптимизации законов уклонения для случаев использования противником цифровых алгоритмов обработки информации и алгоритмов вторичной обработки сигналов.

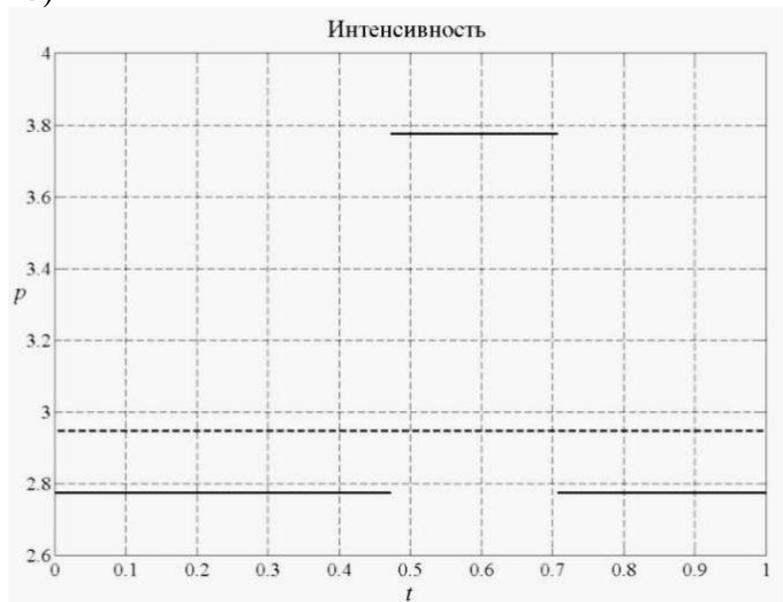
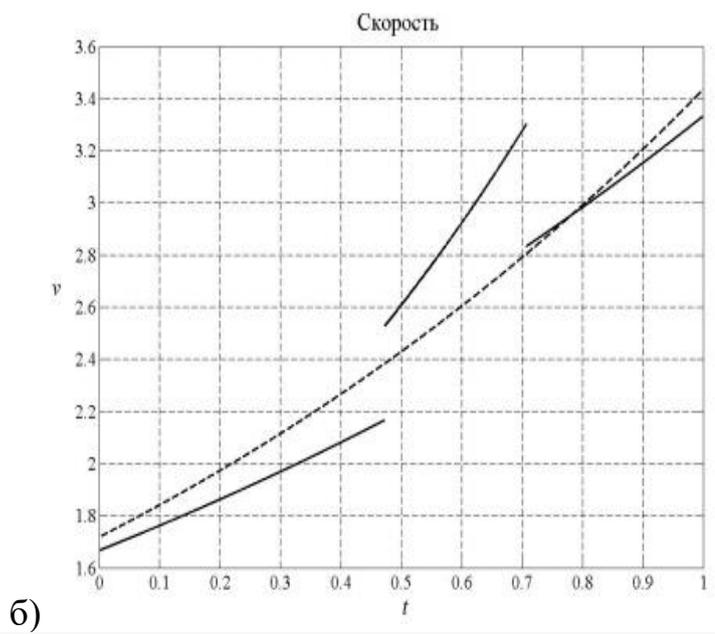
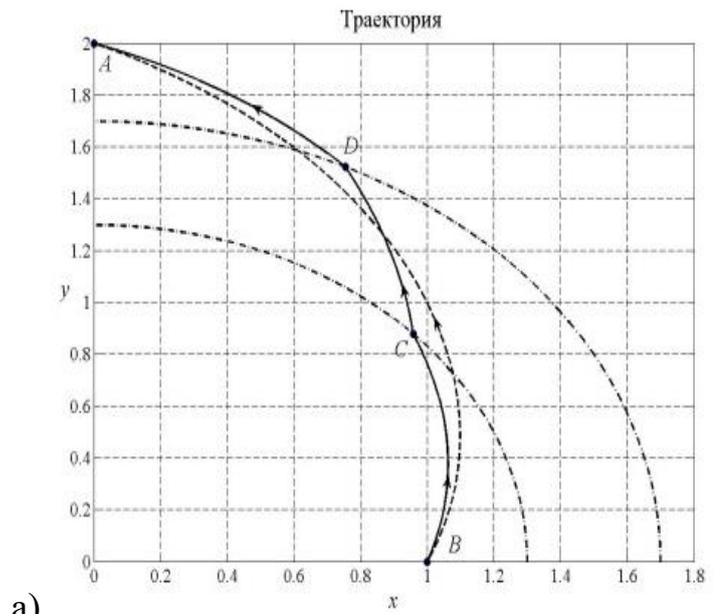


Рис. 5.4.2. Графики, построенные на основе аналитического решения задачи для системы «сенсор – поисковое средство, действующее внутри «кольца»: а) траектория ПО, б) скорость движения ПО, в) интенсивность поиска маневренного поискового средства

## **5.5. Моделирование поиска морского подводного объекта по следу**

В данном разделе приводятся теоретические и модельные оценки вероятности обнаружения МПО по гидрофизическому полю, с использованием математических моделей динамики формирования и развития глубинного и поверхностного следов, образующихся при движении МПО. При построении моделей использованы результаты теоретических, лабораторных и натурных экспериментальных исследований отечественных и зарубежных авторов.

### ***5.5.1. Динамика глубинного и поверхностного следов морского подводного объекта***

Содержательно качественный характер физических процессов может быть описан следующим образом. При движении МПО за телом образуется глубинный турбулентный след. На начальном участке турбулентный след в однородной и неоднородной жидкостях развивается одинаково и расширяется в плоскостях, ортогональных оси движения объекта, симметрично [95; 543]. Однако при стратификации жидкости вертикальной турбулентной диффузии препятствуют силы плавучести (архимедовы силы). Из-за турбулентного перемешивания плотность жидкости в пределах следа оказывается распределенной более равномерно, чем вне его. Архимедовы силы стремятся восстановить прежнее невозмущенное состояние стратификации, возвращая частицы воды на горизонты их равновесного состояния. В результате след перестает расти в вертикальном направлении, приобретает сплюсненную форму и начинает совершать квазигоризонтальные колебания.

Частицы жидкости, составляющие турбулентный след, одновременно с квазигоризонтальными колебаниями следа как целого, участвуют в вертикальных и горизонтальных движениях внутри следа. По мере развития следа в нем формируются упорядоченные вихревые структуры с преимущественно вертикальным распределением завихренности – монополи, диполи и другие образования. Эти структуры взаимодействуют между собой и с окружающей средой, также генерируя внутренние волны и при определенных условиях образуя большие долго живущие плоские вихри, наблюдаемые на поверхности.

Конкретный характер развития следа зависит от того, движется ли МПО равномерно и прямолинейно, генерируя безымпульсный (безмоментный) след, или маневрирует по скорости и/или по направлению. Описание математических моделей отдельных процессов динамики развития и вырождения следа составляет содержание настоящего раздела. Модели формулируются в терминах макропараметров, определяющих состояние водной среды и характеристики объектов.

По данным океанологических наблюдений [134; 296] за пределами поверхностного слоя волнового перемешивания (толщиной до 30-50 м), в основной толще океана турбулентность сосредоточена в локальных участках – пятнах турбулентности с довольно резко очерченными границами. Этот вид турбулентности получил название мелкомасштабной.

Толщина пятен составляет метры, линейные размеры – несколько сотен метров. Турбулентное перемешивание происходит периодически и в ограниченных объемах. При этом появляется пятно или группа пятен с повышенной интенсивностью турбулентного перемешивания. За их пределами турбулентность либо отсутствует, либо очень слабая. Современные взгляды на процессы возникновения и развития турбулентности в устойчиво стратифицированной по плотности жидкости имеют следующий вид [39; 47]. Под действием внешних сил в стратифицированной жидкости возникают внутренние волны большого масштаба. Их нелинейное взаимодействие приводит к возникновению областей – пятен перемешанной жидкости. Пятна эволюционируют, постепенно сплющиваясь и внедряясь в окружающую стратифицированную нетурбулизированную среду отдельными языками – интрузиями. На начальных стадиях развития эволюционирующие турбулентные пятна порождают внутренние волны. Эти волны, излученные пятнами, взаимодействуют между собой и порождают новые пятна турбулентности меньшего масштаба и т. д. В конце концов, происходит вязкое разрушение пятна.

### ***5.5.2. Вероятность обнаружения МПО по глубинному кильватерному следу***

Процесс эволюции глубинного следа может быть разбит на два этапа:

- этап формирования следа (ближний след в области, прилегающей к подводному объекту);
- этап существования и вырождения следа (установившийся след).

Процесс эволюции следа в неоднородной среде сопровождается распространением внутренних волн и формированием областей с

повышенным уровнем турбулентности (возмущений). Одновременно в среде всегда присутствуют и случайно возникающие и существующие в течение некоторого времени области с повышенным уровнем турбулентности (аномалии). Эти возмущения являются фоновыми. Движущийся подводный объект создает в прилегающей к нему области среды дополнительные аномалии, увеличивая тем самым их концентрацию в среде. Различие концентраций аномалий в среде в отсутствие объекта (в фоне) и при наличии объекта является признаком, по которому принимается решение об обнаружении глубинного следа ПО.

В стратифицированной среде течение слоёв жидкости устойчиво при числе Ричардсона равном  $Ri > 0,25$ . Число  $Ri$  случайное и имеет показательное распределение с плотностью  $1/Ri_{cp} \exp(-x/Ri_{cp})$ ,  $x \geq 1$ . В целях моделирования принимается для определенности значение  $Ri$  из интервала  $[1, 2]$ , отвечающего слабому уровню стратификации среды.

Вероятность потери устойчивости (вследствие прохода МПО) ламинарного течения слоёв и появления турбулентных пятен (или аномалий) различного размера оказывается равной  $P(Ri < 0,25 | Ri_{cp} = 1,5) = 0,154$ . Принимается, что суммарный объём аномалий в единице объема водной среды совпадает численно с этой вероятностью. Тем самым объёмная плотность  $\lambda$  аномалий принимается равной  $\lambda = 0,154 \text{ м}^{-3}$ , если  $Ri_{cp} = 1,5$ . Ниже она обозначается через  $\lambda_{kc}$  (нижний символ здесь и далее обозначает область среды;  $kc$  – кильватерный след).

Аномалии имеются и в среде, не возмущенной прохождением ПО, но их плотность существенно ниже. Эмпирически устанавливается, что эта плотность, называемая фоновой и обозначаемая через  $\lambda_{\phi}$ , в 11 раз меньше, чем  $\lambda_{kc}$ . В частности,  $\lambda_{\phi} = 0,014 \text{ м}^{-3}$ , если  $Ri_{cp} = 1,5$ .

Ниже при расчетах, а также и при моделировании, приходится иметь дело с плоскостной и линейной плотностями; они определяются через проекции объёмных аномалий на заданную плоскость и заданную линию соответственно. Нет необходимости вводить для них специальные обозначения, так как уже из размерностных соображений при записи (например,  $\lambda_{\phi} = 0,014 \text{ м}^{-1}$ ) следует, о какой плотности идет речь (в нашем примере о линейной плотности  $\lambda_{\phi}$ ).

Пусть измерительное устройство обнаруживает каждую встретившуюся аномалию. Предположим, что поле аномалий генерируется при моделировании последовательностью испытаний Бернулли, тогда при движении в водной среде соответствующего датчика, на выходе регистратора аномалий

возникает поток импульсов (по одному импульсу на каждую аномалию без учета ее размера). Расстояние между этими импульсами (измеряемое, например, числом шагов или временных интервалов), имеет геометрическое распределение  $p_i = q^k p$ , где  $k$  – число шагов,  $p$  – вероятность успеха в схеме Бернулли,  $q = 1 - p$  – вероятность неуспеха. В некоторых условиях биномиальное распределение может быть приближено пуассоновским распределением. Ниже будем пользоваться показательным распределением расстояния между соседними аномалиями или, что то же самое, будем считать поток встречных аномалий (при движении ПО по заданной траектории) пуассоновским. Если  $\nu$  случайная величина, имеющая смысл числа аномалий, встреченных на пути длиной в  $L$  км, то распределение  $\nu$  имеет вид распределения Пуассона, так что

$$P(\nu = i) = e^{-\lambda L} \frac{(\lambda L)^i}{i!}, \quad i = 1, 2, \dots,$$

где  $\lambda$  принимает значение либо в фоне равно  $\lambda_\phi = 0,014$ , либо в следе МПО равно  $\lambda_{cp} = 0,154$ .

Последнее, в частности, означает, что в кильватерном следе на пути длиной  $L = 10$  км будет встречаться в среднем  $\lambda_{cp} L = 1,54$  аномалий; в фоне на пути длиной  $L = 100$  км встретится в среднем  $\lambda_\phi L = 1,4$  аномалий, и т. д. Вероятности вообще не встретить ни одной аномалии при таких значениях параметров равны величинам

$$P_{kc}(\nu = 0; L = 10 \text{ км}) = e^{-1,54} = 0,125,$$

$$P_\phi(\nu = 0; L = 100 \text{ км}) = e^{-1,4} = 0,127.$$

Регистратор аномалий, подобно всякому решающему устройству, можно настроить на требование иметь заданную вероятность ложной тревоги, т. е. вероятность зарегистрировать аномалию в фоне не более одного раза на пути заданной длины. Обычно, порог регистратора выставляется из условия иметь в среднем одно превышение порога регистратора на 100 км пути в фоне. Это означает, что для настройки регистратора величина  $\lambda_\phi = 0,014 \text{ км}^{-1}$  должна быть снижена, по сравнению с требуемым значением  $\lambda_\phi = 0,01 \text{ км}^{-1}$ , в 1,4 раза, и соответственно прежнее значение  $\lambda_{kc} = 0,154 \text{ км}^{-1}$  в фоне уменьшится во столько же раз до величины  $\lambda_{kc} = 0,11 \text{ км}^{-1}$ . Вероятности вообще не зарегистрировать ни одной аномалии при таком выборе порога будут равны

$$P_{kc}(\nu = 0; L = 10 \text{ км}) = e^{-1,1} = 0,323$$

на 10 км пути в кильватерном следе и

$$P_\phi(\nu = 0; L = 100 \text{ км}) = e^{-1} = 0,368$$

на 100 км пути в фоне вместо прежних значений 0,125 и 0,127 соответственно. Значительно более интересными являются вероятности  $P_{\kappa c}(\nu \geq 1; L = 1 \text{ км})$  и  $P_{\phi}(\nu \geq 1; L = 1 \text{ км})$  на «единичном» шаге длиной в 1 км, интерпретируемые соответственно как вероятность правильной регистрации аномалии и вероятность ложного срабатывания регистратора при единичном испытании. Эти вероятности равны

$$\text{ОБН: } P_{\kappa c}(\nu \geq 1; L = 1 \text{ км}) = 1 - P_{cp}(\nu = 0; L = 1 \text{ км}) = 0,11,$$

$$\text{ЛТ: } P_{\phi}(\nu \geq 1; L = 1 \text{ км}) = 1 - P_{\phi}(\nu = 0; L = 1 \text{ км}) = 0,01$$

(здесь использованы сокращения: ЛТ – ложная тревога, ОБН – обнаружение).

Решение при единичном испытании нельзя признать надежным, а тем более считать окончательным. Окончательное, надежное решение принимается по результатам регистрации аномалий в нескольких испытаниях. Практически значимым является движение регистратора маневрами «квадрат» и «зигзаг». Кильватерный след считается надежно обнаруженным, если на общем числе  $n$  галсов длины  $L_0$  км каждый было зарегистрировано  $m$  или более аномалий, где  $m < N$  и целое  $N$  численно равно произведению  $n L_0$ , выраженному в км. В модели используются значения 10, 15 и 20 км, а  $n = 4, \dots, 10$ . Число  $m$  выбирается из условия обеспечения максимума суммарной (по  $m$  взглядам) вероятности правильного обнаружения  $P_{cp}(S_n > m)$  при заданной вероятности ошибки 1-го рода (ложной тревоги)  $P_{\phi}(S_n > m)$ . Здесь  $S_n$  число зарегистрированных аномалий на суммарном пути длиной  $n L_0$  км, проходящем при выполнении маневра «квадрат» или совместном выполнении маневров «квадрат» и «зигзаг». Как рекомендовано в [31], порог  $m$  выбирается в пределах  $NP_{\phi}(S_n > m) < m < NP_{\kappa c}(S_n > m)$ . Среднее число шагов до обнаружения

$T_{\text{обн}}$  равно в этом случае  $T_{\text{обн}} = \frac{N}{P_{\kappa c}(S_n > m)}$ , а средняя частота  $f_{\text{лм}}$  ложных

тревог составляет  $f_{\text{лм}} = \frac{P_{\phi}(S_n > m)}{N}$ . Ясно, что эти выражения равны

$$P_{\kappa c}(S_n > m) = \sum_{k=m+1}^N C_N^k P_{\kappa c}(\nu \geq 1; L = 1 \text{ км})^k (1 - P_{\kappa c}(\nu \geq 1; L = 1 \text{ км}))^{N-k}, \quad (5.5.1)$$

$$P_{\phi}(S_n > m) = \sum_{k=m+1}^N C_N^k P_{\phi}(\nu \geq 1; L = 1 \text{ км})^k (1 - P_{\phi}(\nu \geq 1; L = 1 \text{ км}))^{N-k}, \quad (5.5.2)$$

где  $C_N^k$  число сочетаний из  $N$  по  $k$ . Формулами (5.5.1) и (5.5.2) при выбранном пороге  $m$  и параметрах  $N$ ,  $P_{\kappa c}(\nu \geq 1; L = 1 \text{ км})$ ,  $P_{\phi}(\nu \geq 1; L = 1 \text{ км})$  определены соответственно условная вероятность правильного обнаружения (5.5.1) при условии нахождения регистратора в кильватерном следе и условная вероят-

ность ошибочного решения (5.5.2) при условии нахождения его (регистрирующего прибора) в фоне. Разумеется, безусловные вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги зависят от априорных вероятностей выйти на кильватерный след (если он есть) и/или остаться в фоне.

### 5.5.3. Поиск аномалий при выполнении маневров

Пусть полоса следа шириной  $d = 10$  км пересекается траекторией регистратора под углом  $\alpha$ . Вычислим среднюю по углу  $\alpha$  вероятность найти хотя бы одну аномалию на такой прямолинейной траектории по формуле

$$P(v \geq 1) = 1 - \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} q^{d/\sin \alpha} d\alpha. \quad (5.5.3)$$

При  $q = 0,89$  вычисленная по формуле (5.5.3) средняя по углу вероятность равна  $P(v \geq 1) = 1 - 0,167 = 0,833$ .

Маневр «квадрат» следует выполнять при обнаружении регистратором аномалии. Решение об обнаружении следа принимается в случае нахождения еще одной аномалии при выполнении этого маневра. Предположим, что маневр «квадрат» начинает выполняться с середины следа. Пусть  $a$  км – длина стороны квадратной «коробочки» и нужно найти длину траектории  $L(\alpha)$ , проходящей внутри следа как функцию угла  $\alpha$ . Предположим, что вершина квадрата лежит на середине следа, тогда справедлива формула

$$L(\alpha) = \begin{cases} \frac{d}{\cos \alpha} + a(1 + \tan \alpha), & \text{где } \alpha \in [0; \alpha_1]; \\ \frac{3d}{2 \cos \alpha} + \frac{d}{2 \sin \alpha}, & \text{где } \alpha \in [\alpha_1; \alpha_2]; \\ \frac{d}{\cos \alpha} + \frac{d}{\sin \alpha} + 2a - a(\tan \alpha + \cot \alpha), & \text{где } \alpha \in [\alpha_2; \pi/4]; \end{cases} \quad (5.5.4)$$

$$\text{где } \alpha_1 = \arcsin \frac{d}{2a}, \quad \alpha_2 = \arcsin \frac{1}{4} \left( \sqrt{8 - \frac{d^2}{a^2}} - \frac{d}{a} \right).$$

Среднее значение длины траектории в следе  $L$  по всем углам  $\alpha$  выражается формулой

$$L = \int_0^{\pi/4} L(\alpha) d\alpha. \quad (5.5.5)$$

Вычислим интеграл (5.5.5) при виде функции  $L(\alpha)$  (5.5.4) для различных отношений  $d/a$ . Пусть  $d/a = 1$ , тогда следует, что  $L \approx 2,363d$ , а при  $d/a = 1/\sqrt{2}$ , получаем  $L \approx 3,015d$ .

При  $d/a \in [1/\sqrt{2}, 1]$  приближенно выполнено соотношение

$$L = 1,6a + 0,8d, \quad (5.5.6)$$

позволяющее находить значение из приведенного интервала отношения  $d/a$  без интегрирования и усреднения  $L(\alpha)$  по углам.

Из последней формулы следует, что при выполнении маневра «квадрат» при  $d = a = 10$  км средняя длина траектории внутри следа равна  $L = 24$  км, соответственно  $40 - 24 = 16$  км траектории проходит в фоне. Вероятность обнаружить хотя бы одну аномалию на траектории, проходящей через последовательные 24 квадрата в следе и 16 квадратов 1 км на 1 км в фоне равна

$$P(v \geq 1) = 1 - (0,89)^{24} (0,99)^{16} = 1 - 0,05 = 0,95.$$

Примерно 5% остается на то, что при выполнении маневра «квадрат» след не будет идентифицирован.

Если при выполнении маневра «квадрат» длиной 40 км будет обнаружена хотя бы одна аномалия, то в дальнейшем выполняется маневр «зигзаг» длиной 60 км (шесть галсов длиной 10 км). Если при выполнении обоих маневров на траектории движения обнаруживается более 6 аномалий, то принимается решение об обнаружении следа. Найдем вероятность такого события, считая, что  $d = a = 10$  км и отношение длины траектории, находящейся внутри следа к длине пути в фоне одинаково для обоих маневров и равно  $24 : 16 = 3 : 2$ . Для вычисления будем пользоваться пуассоновским распределением вероятности обнаружения:

$$P(v \geq 6) \cong P_1(v \geq 6) + P_1(v = 5)(1 - P_2(v = 0)) + P_1(v = 4)(1 - P_2(v = 0) - P_2(v = 1)), \quad (5.5.7)$$

где  $P_1(v = i) = \frac{6,6^i}{i!} e^{-6,6}$ ,  $P_2(v = i) = \frac{0,4^i}{i!} e^{-0,4}$ , а показатели экспонент вычислены следующим образом  $6,6 = 0,11 \cdot 60$ ,  $0,4 = 0,01 \cdot 40$ . Подставляя вычисленные значения вероятностей в (5.5.7), находим

$$P(v \geq 6) \cong 0,645 + 0,142(1 - 0,67) + 0,1076(1 - 0,67 - 0,2681) = 0,6985.$$

Отсюда следует, что вероятность принять решение об обнаружении следа равна

$$P_{\text{обн}} = 0,95 \cdot 0,6985 = 0,6636. \quad (5.5.8)$$

Найдем вероятность принятия решения об обнаружении следа, если отношение длины траектории, находящейся внутри следа к длине пути в фоне одинаково для обоих маневров и равно 2:1

$$P(v \geq 6) \cong P_1(v \geq 6) + P_1(v = 5)(1 - P_2(v = 0)) + P_1(v = 4)(1 - P_2(v = 0) - P_2(v = 1)),$$

где  $P_1(v = i) = \frac{7,3^i}{i!} e^{-7,3}$ ,  $P_2(v = i) = \frac{0,33^i}{i!} e^{-0,33}$ , а показатели экспонент вычислены следующим образом  $7,3 \approx 0,11 \cdot 66,5$ ,  $0,33 = 0,01 \cdot 33$ . Снова подставляя вычисленные значения вероятностей в (5.5.7), находим

$$P(v \geq 6) \cong 0,736 + 0,1167(1 - 0,719) + 0,08(1 - 0,719 - 0,2372) = 0,772.$$

Вероятность принять решение об обнаружении следа равна

$$P_{обн} = 0,95 \cdot 0,772 \approx 0,733.$$

Очевидно, что при увеличении относительной длины траектории обнаружения, проходящей внутри следа, вероятность принять решение об обнаружении следа возрастает. Далее, вычисленные вероятности сравниваются с частотами, полученными при имитационном моделировании.

#### **5.5.4. Сравнение теоретических результатов с результатами имитационного моделирования**

При моделировании зона поиска представляется в виде сетки с квадратными ячейками со стороной 1 км. В каждой ячейке сетки может размещаться одна аномалия диаметром 1 км. Зоне поиска сопоставляется двумерная матрица  $A_{km}$ , где длина строки матрицы есть длина района поиска  $K$ , т. е.  $\max k = K$ , количество элементов матрицы в столбце равно  $M$  ( $\max m = M$ ), это ширина района поиска. Нулевое значение элемента матрицы соответствует отсутствию аномалии в соответствующей ячейке зоны поиска. Исходным параметром модели является плотность фоновых аномалий в зоне поиска  $p_\phi = 0,01$ , которая определяется предположением о том, что при помощи выбора порога поисковые приборы настраиваются таким образом, что при движении регистратора одна аномалия фиксируется в среднем на 100 км траектории. Количество аномалий в зоне поиска, определяемое этим предположением, равно  $k = NMr_\phi$ .

При реализации модели статистическая оценка среднего расстояния между обнаружениями (длины свободного пробега) при движении объекта по случайным прямолинейным траекториям в фоне равна 102,72 км. Эта величина есть сумма всех расстояний между двумя последовательными обнаружениями, деленная на количество обнаружений аномалий при движении регистратора, где количество обнаружений аномалий равно  $10^5$ .

В случае движения регистратора в среде, образованной следом МПО, плотность аномалий в следе равна  $p_\phi = 0,11$ . При реализации модели

статистическая оценка среднего расстояния между обнаружениями при движении объекта по случайным траекториям внутри следа равна 8,48 км.

В зоне поиска имитируются фоновые аномалии и глубинный след при движении МПО. Подвижный объект движется по траектории, состоящей из отрезков, соединяющих заданный набор точек. Его движение имитируется по тактам таймера, за один такт регистратор проходит расстояние, равное 1 км. В соответствии со скоростью движения МПО рассчитывается интервал времени, соответствующий одному такту таймера. Полученное значение используется при расчетах длины пути, пройденного за такт таймера регистратором. При пересечении аномалии регистратор начинает выполнение маневра «квадрат» с заданной длиной галса  $a$ . Если за время маневрирования коробочкой обнаружено от 1 до 6 аномалий, начинается выполнение маневра «зигзаг». Для этого по всем аномалиям, обнаруженным при выполнении коробочки, включая первую, методом наименьших квадратов определяется предположительное направление следа. Затем выполняется 6 галсов длиной  $(L - 4a) / 6$  км, пересекающих это направление. Если в процессе маневрирования обнаружено 7 или больше аномалий (включая первую аномалию, с которой начинается маневр «квадрат»), то принимается решение об обнаружении следа, после завершения очередного галса маневрирование зигзагом прекращается.

При моделировании определяются статистические оценки следующих величин.

*Среднее расстояние между обнаружениями* рассчитывается как отношение длины пути, пройденного регистратором, к количеству аномалий, пересеченных на этом пути.

*Вероятность выполнения зигзага при маневрировании* рассчитывается как отношение количества выполненных зигзагов к количеству выполненных коробочек.

*Вероятность ложного решения об обнаружении* рассчитывается как отношение случаев принятия решения об обнаружении следа (обнаружении 7 и более аномалий) при маневрировании в фоне в отсутствии объекта к количеству выполненных маневров «квадрат».

*Вероятность правильного решения об обнаружении* при маневрировании в следе рассчитывается как отношение случаев принятия решения об обнаружении следа при маневрировании в следе к количеству выполненных маневров «квадрат».

Сравнительный анализ теоретических результатов и оценок, полученных при статистическом моделировании, иллюстрируется таблицей 5.5.1.

Таблица 5.5.1. Статистические оценки при маневрах в фоне и следе

|  | Фон<br>(моделир.) | Фон (теор.)       | След<br>(моделир.) | След (теор.)     |
|--|-------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| Среднее расстояние между обнаружениями, км                   | 102,72            | 100               | 8,48               | 9                |
| Вероятность выполнения зигзага при маневрировании            | 0,32              | $0,33=1-e^{-0,4}$ | 0,99               | $0,997=1-e^{-6}$ |
| Вероятность ложного решения об обнаружении (в фоне)          | 0,00014           | 0,00007           | –                  | –                |
| Вероятность правильного решения при маневрировании (в следе) | –                 | –                 | 0,92               | 0,935            |

При поперечном пересечении регистратором следа ПО определяются статистические оценки следующих величин.

*Вероятность обнаружения аномалии* при пересечении следа вычисляется как отношение маневрирований в следе (маневров «квадрат», выполненных в следе) к количеству пересечений следа.

*Вероятность выполнения зигзага* при маневрировании вычисляется как отношение количества маневров «зигзаг», выполненных в следе к количеству маневров «квадрат», выполненных в следе.

*Вероятность правильного решения* при маневрировании вычисляется как отношение количества решений об обнаружении к количеству маневрирований в следе.

Полученные статистические оценки представлены в таблице 5.5.2. Ширина следа полагается равной 10 км.

Таблица 5.5.2. Статистические оценки при поперечном пересечении следа

|  | Пересечение следа<br>(моделир.) | Пересечение следа<br>(теор.) |
|--|---------------------------------|------------------------------|
| Вероятность обнаружения аномалии при пересечении следа       | 0,72                            | $0,69=1-(8/9)^{10}$          |
| Вероятность выполнения зигзага при маневрировании в следе    | 0,96                            | 0,95                         |
| Вероятность правильного решения при маневрировании (в следе) | 0,77                            | 0,73 по формуле (5.5.7)      |

При пересечении регистратором следа ПО под произвольным углом определяются статистические оценки следующих величин.

*Вероятность обнаружения аномалии* при пересечении следа вычисляется как отношение маневрирований в следе (маневров «квадрат», выполненных в следе) к количеству пересечений следа.

*Вероятность выполнения зигзага* при маневрировании вычисляется как отношение количества маневров «зигзаг», выполненных в следе к количеству маневров «квадрат», выполненных в следе.

*Вероятность правильного решения* при маневрировании вычисляется как отношение количества решений об обнаружении к количеству маневрирований в следе.

Полученные статистические оценки представлены в таблице 5.5.3. Ширина следа полагается равной 10 км.

Таблица 5.5.3. Статистические оценки при пересечении следа под произвольным углом

| Показатель  | Пересечение следа (моделир.) | Пересечение следа (теор.) |
|---|------------------------------|---------------------------|
| Вероятность обнаружения аномалии при пересечении следа    | 0,875                        | 0,833 по формуле (5.5.3)  |
| Вероятность выполнения зигзага при маневрировании в следе | 0,96                         | 0,95                      |
| Вероятность правильного решения при маневр. (в следе)     | 0,685                        | 0,664 по формуле (5.5.8)  |

Все статистические данные находятся в хорошем согласовании. Оценки, полученные моделированием различных ситуаций поиска объекта, и теоретические оценки, полученные по дискретной вероятностной модели отличаются друг от друга на величину не более чем 5%. Поэтому представляется разумным использовать одновременно аналитические модели и математическое моделирование применения различных сил и средств при планировании их совместных миссий для более быстрого принятия решений в той или иной ситуации без потери правильной ее оценки.

Чтобы оценить вероятность обнаружения объекта по гидрофизическому полю (в нашем случае глубинному кильватерному следу), нужно перемножить геометрическую вероятность обнаружения ПО при патрулировании района, и вероятность (5.5.7). В случае принятия решения об обнаружении регистратором глубинного следа вертолет может выполнить акустический допоиск с помощью РГАС (радиогидроакустическая станция) и с помощью ОГАС (опускаемая гидроакустическая станция).

В задачах поиска необходимо проводить сравнение статистических оценок случайных величин с результатами компьютерного моделирования. Из результатов моделирования можно сделать вывод о возможном прохождении МПО через исследуемый район и направлении его движения при текущем отсутствии МПО в районе поиска. С точки зрения дальнейшего поиска МПО

важно иметь возможность выдать рекомендации поисковым единицам, работающим в соседних с исследуемым районом областях пространства.

Рассмотренные в пятой главе результаты исследований и практика их проведения дают основания сделать следующие **выводы**.

Теоретико-игровое моделирование целесообразно использовать на этапах определения замысла и завершения принятия решения. Кроме того, эти модели можно использовать и в ходе ведения боевых действий на море при управлении силами. Теоретико-игровые модели не требуют большого количества времени на их разработку и интуитивно понятны. Имитационные модели дают более полную картину предстоящих боевых действий и оценивать эффективность выполняемых задач наиболее достоверно по сравнению с другими математическими моделями. Но их разработка и реализация («розыгрыш») занимают достаточно продолжительное время и требуют больших вычислительных мощностей от ЭВМ. Поэтому использовать их целесообразно на этапе планирования боевых действий на море при условии заблаговременно разработанных на мероприятиях оперативной и боевой подготовки, в процессе повседневной деятельности имитационных моделей тактических ситуаций (создавая тем самым некую базу, использование которой в дальнейшем позволит существенно сократить время на разработку моделей).

Опыт использования оперативно-тактического тренажерного комплекса «Автоматизм» в процессе проведения учебных занятий со слушателями Военно-морской академии показал, что подсистема имитационного моделирования тренажера позволяет достичь поставленных учебных целей на занятии. Вместе с тем использование этой подсистемы для поддержки принятия решения на ведение боевых действий, в силу временных затрат, требующихся на разработку и розыгрыш имитационных моделей, пока невозможно в силу отсутствия так называемой базы тактических ситуаций. В многофункциональном имитационно-моделирующем комплексе ВМФ такая база существует.

Несколько слов стоит сказать о том, что математическое моделирование на основе цифровых двойников среды применения и моделей динамических объектов позволяет прогнозировать развитие ситуации и для гражданских задач, например, при разработке автоматизированных систем безопасного судовождения, способных разводить в пространстве и времени сотни судов одновременно.

## ГЛАВА 6. МОДЕЛИ БОЕВЫХ ДЕЙСТВИЙ В ВОЗДУХЕ

Глава состоит из четырех разделов. В первом разделе представлен обзор моделей боевых действий в воздухе. Во втором разделе рассмотрены теоретико-вероятностные модели, основанные на теории поиска, теории массового обслуживания и теории надежности. Третий раздел посвящен описанию задач оптимального управления, динамического программирования и дифференциальных игр. В последнем разделе описаны оптимизационные и теоретико-игровые модели боевых действий в воздухе.

### 6.1. Обзор моделей боевых действий в воздухе

Исследование операций (как научная дисциплина и совокупность моделей и методов исследования задач обороны и безопасности) начала формироваться в Англии в 1935-1938 гг. в связи с потребностями именно военно-воздушных сил<sup>1</sup>. К концу Второй мировой войны в ВВС США действовало свыше двух десятков отделов исследования операций. С содержанием исследований того времени можно ознакомиться по книге [239].

В 1948 г. командование сухопутными войсками США сформировало управление по исследованию операций. В 1949 г. в ВВС учредили Проект РЭНД (RAND – от словосочетания «research and development», «исследования и разработки») при авиационной корпорации «Дуглас» (в последующем – RAND Corporation). К началу 1950-х годов эти организации были укомплектованы штатом сотрудников, численность которого превышала численность лиц, занимавшихся в военное время исследованием операций во всех странах антигитлеровской коалиции, вместе взятых.

Для оценки перспективности тех или иных моделей боевых действий проводятся концептуальные исследования, учитывающие исторический опыт применения авиации и ПВО, а также состояние и ожидаемые результаты технологического прогресса.

---

<sup>1</sup> См. История Исследования операций. – URL: <http://www.ccas.ru/depart/malashen/21rfrm.htm> (дата обращения – 1.07.2024).

У. Байер, Т. Долл и Т. Шиллер в [423] исследовали тенденции развития военных технологий и вооружения (искусственный интеллект и автоматизированные системы принятия решений, БПЛА, микроспутники, гиперзвуковое оружие, ствольная и реактивная артиллерия и др.) и вызванные ими изменения в тактике, оперативном искусстве и стратегии. По мнению авторов, в частности, ожидаются следующие изменения в боевых возможностях и задачах войск:

- за счет применения активно-реактивных снарядов и ракет дальность стрельбы ствольной артиллерии будет превышать 100 км, а реактивной – до 600 км;

- сократится функциональный разрыв между самолетами, БПЛА, гиперзвуковыми и крылатыми ракетами, а также реактивной артиллерией;

- надежная защита от кибератак возможна только за счет производства компьютерных систем и программного обеспечения внутри страны;

- построение цифровых моделей местности будет способствовать решению задач навигации и позиционирования;

- возрастание роли и расширение задач ПРО/ПВО.

Авторами [423] рассмотрена концепция боевых зон:

- городская зона (бои в крупных городах);

- ближняя зона (бои на дальности до 100 км);

- дальняя зона (бои на дальности до 600 км);

- стратегическая зона (бои на дальности более 600 км);

- орбитальная зона (бои в тропосфере и космосе).

По мнению У. Байера, Т. Долла и Т. Шиллера [423] основная идея их введения заключается в том, что превосходство во внешней (более глубокой) зоне приводит к повышению вероятности победы во внутренних зонах.

Следует отметить, что, несмотря на развитие и совершенствование систем мониторинга и разведки, «туман войны» (и связанные с ним неопределенности) никуда не денется, что связано в первую очередь с активным противодействием противника.

Х. Джордан [490] предложил концепцию «Трех горизонтов». В основе этой концепции лежит известная идея о том, что многие организации и технологии функционируют в соответствии со следующим жизненным циклом: инициация, рост и успех, упадок (см. также [45]).

Х. Джордан выделяет три горизонта, существующие ныне одновременно, но на разных этапах своих циклов:

- первый горизонт (Г1) – ведущая роль пилотируемой боевой авиации и второстепенная роль беспилотных авиационных систем (доминирующие в настоящее время пилотируемые платформы);

– второй горизонт (Г2) – развитие существующих боевых систем или выбор радикально новых, способных преодолеть известные трудности в развитии классических систем (переходная фаза);

– третий горизонт (Г3) – это «преобразующее видение», новая парадигма, находящаяся еще в зачаточном состоянии.

На протяжении всей своей вековой истории боевая авиация была пилотируемой. Вместе с тем, развитие беспилотных систем началось почти параллельно (первые прототипы появились в годы Первой мировой войны). В годы холодной войны наблюдалось ограниченное развитие БПЛА. В последние два десятилетия в интересах борьбы с терроризмом и повстанцами стали все более широко применяться БПЛА. Тем не менее, опыт локальных конфликтов в Сирии, Ливии и Нагорном Карабахе показал ограниченность возможностей БПЛА в потенциальных конфликтах между передовыми армиями, где обе стороны будут использовать для нейтрализации БПЛА средства РЭБ и другие специальные средства. Сегодня БПЛА практически заменили пилотируемые самолеты при решении таких задач, как разведка, наблюдение и рекогносцировка. Поскольку названные задачи на поле боя являются вспомогательными, то эти инновации не бросают вызов текущему первому горизонту Г1 [490].

Тем не менее, пилотируемая авиация столкнулась с рядом вызовов.

Первый. Растущие затраты на разработку, приобретение, эксплуатацию и обслуживание пилотируемых авиационных платформ.

Второй. Новые системы ПВО/ПРО создают серьезную угрозу пилотируемой авиации, создавая зоны запрета доступа.

Третий. Постепенное распространение БПЛА, трактуемое Х. Джорданом как третий горизонт (ведущая роль беспилотных комплексов в боевых и ударных задачах).

Методы и модели боевых действий в воздухе в военные и послевоенные годы активно развивались и в СССР. В начальный период после Великой Отечественной войны основным оружием истребительной авиации являлись авиационные пушки, и любая боевая операция включала в себя воздушную стрельбу. Теоретические основы оценки эффективности стрельбы разработаны А.Н. Колмогоровым [318], в интересах авиации большая научно-методическая работа велась В. С. Пугачевым и Е. С. Вентцель. Основными составляющими задачи повышения боевых возможностей самолетов в 1950-х гг. были [12]:

- боевые траектории: перехват, воздушный бой;
- действие боеприпасов по целям: боевая живучесть целей, эффективность боеприпасов;
- точность стрельбы: баллистика и рассеивание снарядов, прицелы.

В последующие годы разработаны алгоритмы управления истребителем по высоте и скорости, а также методы его наведения на цели. В основе управления боевыми действиями истребителей-перехватчиков лежит так называемая штурманская задача – задача определения возможности и расчета оптимальных параметров перехвата. Результатом ее решения, в частности, являются рекомендованные полусфера атаки, метод и параметры наведения, удаление рубежа перехвата, режим полета (программы набора высоты и скорости, профили полета).

Методы наведения истребителей подразделялись на три группы [12]:

- вектор скорости истребителя направляется непосредственно на цель (метод «погоня»);
- вектор скорости истребителя направляется в некоторую точку встречи («перехват», «маневр», «параллельное сближение»);
- вероятностный метод наведения.

Проведенные исследования позволили сформулировать и обосновать критерии боевой эффективности одиночных боевых авиационных комплексов (БАК) различных типов [55].

*Истребительный БАК* – вероятность своевременного вылета истребителя, его наведения на воздушную цель и поражения цели.

*Ударный БАК* – вероятность своевременного вылета, преодоления ПВО противника, выхода на цель и ее поражения.

*Военно-транспортный авиационный комплекс* – вероятность своевременного вылета, полета по заданному маршруту и выхода на заданные площадки с преодолением ПВО противника (с учетом ожидаемой доли числа десантников или грузов, попавших на заданные площадки).

*Разведывательный БАК* – вероятность своевременного вылета, обнаружения и опознавания объекта разведки и своевременной передачи разведанных.

Учитывая перспективы развития пилотируемой и беспилотной авиации, систем поражения и средств ПВО, а также результаты анализа отечественной и зарубежной литературы в области моделирования боевых действий в воздухе, далее рассмотрим классификацию и характеристики некоторых моделей (основание выбора моделей для обзора – количество ссылок на статьи и полнота представления работ по методам моделирования и масштабу действий).

### **6.1.1. Классификация и краткий обзор моделей боевых действий в воздухе**

Вооруженное противоборство в воздухе организуется на различных уровнях управления (тактическом, оперативном и стратегическом), на его исход влияют множество параметров – как естественные параметры среды (местность, погодные условия, время дня и года), так и внутренние параметры сторон, ведущих противоборство, которые, в свою очередь, могут быть явными (состав сил и средств, тактико-технические характеристики образцов вооружения, военной и специальной техники, запасы оружия и материальных средств и т. д.) или неявными (морально-психологическое состояние войск, воля к победе, интеллект и решительность командующего). Кроме того, вооруженному противоборству свойственны процессы затруднения оценки текущей обстановки командирами и штабами, с другой стороны – маскировка, дезинформация, введение в заблуждение. Все это приводит к тому, что вооруженное противоборство является трудно формализуемым процессом, а, соответственно, задача моделирования такого противоборства – весьма нетривиальной научной задачей.

Модели боевых действий в воздухе можно классифицировать по различным основаниям:

- методы моделирования (см. рис. 6.1.1 и раздел 1.3);
- масштаб боевых действий (операционный, тактический и стратегический уровни);
- и др.

Для моделирования боевых действий в воздухе могут быть использованы следующие методы:

- 1) аналитические методы – методы математического анализа, теории вероятностей, исследования операций;
- 2) статистические методы – методы математической статистики, а также основанные на них методы, например, метод Монте-Карло, последовательный анализ;
- 3) методы оптимизации – методы линейного, нелинейного, динамического программирования, случайный поиск, методы, основанные на принципе максимума Понтрягина, методы решений задач комбинаторики;
- 4) методы теории игр – антагонистические игры, дифференциальные игры, коалиционные игры, игры с природой и т. д.;
- 5) имитационное моделирование.

Отметим, что указанные на рис. 6.1.1 методы применимы и при моделировании боевых действий бомбардировочной, штурмовой и армейской авиации.



Рис. 6.1.1. Задачи и методы моделирования боевых действий ИА и ЗРВ ПВО

На рис. 6.1.2 показан ретроспективный график применения методов моделирования в задаче автономного воздушного боя<sup>1</sup> (операционный уровень) [449].

Математические модели активно внедрялись в образовательный процесс и боевую подготовку частей ВВС и ПВО [55; 138; 324], например, методы, разработанные в 1950-1960-е гг. (теория оптимального управления, дифференциальные игры<sup>2</sup> [13] и др.), не потеряли своей актуальности и в настоящее время. Их результаты встраиваются в качестве типовых блоков в системы

<sup>1</sup> Показанные на рисунке методы применимы также и для моделирования пилотируемых и смешанных воздушных боев.

<sup>2</sup> В дифференциальных играх (см. также раздел 6.3) поведение убегающего и преследователя описывается дифференциальными уравнениями. Эти игры стали развиваться с конца 1950-х гг. независимо в СССР (Л. С. Понтрягин, Л. А. Петросян, Н.Н. Красовский и др.) и США.

поддержки принятия решений командиром подразделения, летчиком или оператором средств ПВО. Ныне они дополняются эвристиками и сценариями для более реалистичного описания боевых действий.

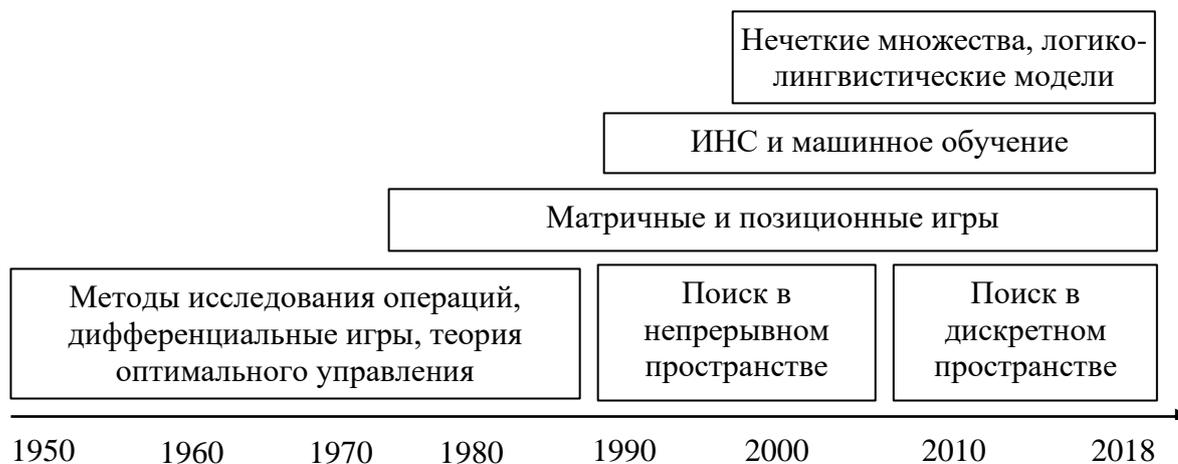


Рис. 6.1.2. Ретроспективный график применения методов моделирования в задаче автономного воздушного боя

В таблице 6.1.1 представлен краткий обзор некоторых работ в области моделирования боевых действий авиации и ПВО.

Таблица 6.1.1. Некоторые работы в области моделирования боевых действий авиации и ПВО

| Работы   | Их краткая характеристика  |
|--|--|
| <b>I. Комплексные работы, справочники, учебные пособия</b>                               |  |
| Дуров В. Р. «Боевое применение и боевая эффективность истребителей-перехватчиков», 1972  | В книге рассмотрены методы оценки наземного наведения и самонаведения перехватчика и ракеты, расчет рубежей перехвата и траекторий сближения перехватчика с целью, определение зон возможных атак и пусков, боевой эффективности и боеготовности как одиночного перехватчика, так и группы самолетов. Даны ссылки на классические работы ([78; 170] и др.). Книга предназначена для специалистов частей ВВС, авиации и ПВО, для слушателей и курсантов авиационных учебных заведений, а также для работников авиационной промышленности. Используются методы аналитической геометрии и математического анализа, обыкновенные дифференциальные уравнения, теория вероятностей, теория массового обслуживания, теория надежности, простейшие методы оптимизации и теории игр |
| «Боевое применение и боевая эффективность авиационных комплексов войск ПВО страны», 1979 | В учебнике изложен материал по теоретическим основам боевого применения и оценки боевой эффективности истребителей-перехватчиков ПВО и направлен на привитие практических навыков в  |

| Работы   | Их краткая характеристика   |
|--|---|
|  | <p>применении методов исследования операций, военной кибернетики и моделирования. Излагаются основные аспекты теории боевого применения истребителей-перехватчиков ПВО, основы теории оценки боевых возможностей и боевой эффективности, моделирования и оптимизации боевых действий ПВО, системного анализа и синтеза истребителей-перехватчиков ПВО на этапах обоснования тактико-технических характеристик и военно-технического проектирования</p>                |
| <p>«Справочник офицера противовоздушной обороны», 1981</p>   | <p>В справочнике дано обобщенное изложение военно-технических и оперативно-тактических вопросов противовоздушной обороны на основе материалов открытой отечественной и зарубежной печати. Авторы придерживаются методологии военно-научных исследований, разработанной Г.К. Триандафилловым. Рассмотрены методы и методики оценки боевых возможностей радиотехнических войск, зенитно-ракетных комплексов, подразделений и частей истребительной авиации (ИА) ПВО</p> |
| <p>«Справочник офицера воздушно-космической обороны», 2006</p>   | <p>Дополняет и расширяет справочник 1981 года, сохраняя прежний подход. Используемые математические методы оценки боевых возможностей и обоснования решений на боевые действия сохранились прежние (теория вероятностей, математическая статистика). Дана общая классификация математических моделей без раскрытия их особенностей применения и характеристик. Справочник по содержанию является скорее альбомом схем и глоссарием</p>                                |
| <p>«Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра», 2004</p> | <p>В монографии освещаются вопросы боевого применения истребительной авиации. На описательном и математическом уровне обоснованы: способы выхода в боевое соприкосновение, ведения групповых и полуавтономных действий, методы поиска воздушных целей и наведения на них и др.</p>  |
| <p>«Боевые авиационные комплексы и их эффективность», 2008</p>   | <p>Учебник предназначен для слушателей и курсантов ВВИА им. Н. Е. Жуковского и инженерных вузов ВВС. В нем изложены теоретические основы функционирования и боевой эффективности авиационных комплексов различного назначения, рассматриваются системы боевых авиационных комплексов (БАК) и влияние принимаемых решений на эффективность их боевого применения; излагаются принципы обоснования тактико-технических требований к перспективным БАК и др. вопросы</p> |
| <p>Моисеев В. С. «Основы теории эффективного применения бес-</p>   | <p>В книге с использованием системного подхода формулируются и решаются такие задачи как оптимизация потребного числа БПЛА, организации</p>   |

| Работы   | Их краткая характеристика  |
|--|--|
| пилотных летательных аппаратов», 2015  | процессов их эффективного применения, оптимизация основных режимов полетов БПЛА, оптимальное размещение наземных компонентов беспилотных авиационных систем и оптимизация процессов их перебазирования   |
| Аверченко С. В., Белоусов В. В. «Беспилотные летательные аппараты в военных конфликтах второй половины XX – начала XXI веков: основные вехи истории», 2023 | Представлен обзор истории появления, совершенствования и боевого применения БПЛА в локальных войнах и вооружённых конфликтах второй половины XX – начала XXI веков. Рассмотрены основные вехи эволюции БПЛА, вопросы расширения круга задач, которые решают беспилотные летательные аппараты в ходе войн, вооружённых конфликтов и антитеррористических операций: разведка и рекогносцировка, боевое обеспечение, огневые (ударные), транспортные, медицинские и др. задачи. Работа может использоваться при постановке задач на моделирование   |
| <b>II. Модели операционного уровня и воздушного боя «один-на-один»</b>   |  |
| Moritz K., Polis R., Well K. H. «Pursuit-evasion in medium-range air-combat scenarios», 1987   | Игра «преследование-уклонение» в сценариях воздушного боя на средней дальности. Стратегии моделирования беспилотного воздушного боя часто строятся путем синтеза законов управления, полученных на основе анализа поведения пилотов. Типичными последовательностями маневров являются: маневрирование перед запуском для благоприятных условий запуска ракеты, маневрирование после запуска для ухудшения ожидаемого ответного огня, уклонение от ракеты, повторная атака. Альтернативная процедура разработки таких стратегий состоит в моделировании сценария воздушного боя как задачи дифференциальной игры или серии таких задач и применении теории дифференциальных игр. В этой статье обсуждается полное моделирование боя «один-на-один» с ракетами средней дальности, включая ограничения по динамическому давлению, радиолокационной заметности и коэффициентам нагрузки. В качестве примера представлено решение с разомкнутым контуром характерной задачи преследования-уклонения, которое сравнивается с результатом моделирования с использованием типичной компьютерной программы моделирования воздушного боя |
| Ярошевский В. А. «Решение одной модельной игровой задачи о дальнем воздушном бое», 2004  | Рассмотрена игровая задача о дальнем воздушном бое двух самолетов в предположении, что экипажи самолетов знают о количестве выстрелов, выполненных противником («шумная» дуэль), и что этой информацией они не обладают («бесшумная» дуэль). Для простейшего случая рассмотрен также   |

| Работы   | Их краткая характеристика   |
|--|---|
|  | промежуточный вариант «смешанной» дуэли. Предполагается, что отношение условных вероятностей поражения самолетов при выполнении выстрелов (пусков ракет) остается постоянным и что траектории самолетов в процессе дальнего воздушного боя (на этапе сближения) заданы. Цена игры определяется разностью безусловных вероятностей поражения самолетов   |
| Arabas P., Malinowski K. «Coordination strategies for hierarchical missile defense system», 2007   | Модель обороны объекта от воздушного удара. Система обороны разделена на ряд секторов. Неопределенность устраняется использованием множества сценариев атаки. Результирующие задачи решаются методом смешанного целочисленного линейного программирования на нижнем уровне и полного перебора или пользовательской эвристики на верхнем уровне  |
| Yu Z., Jing C., Lincheng S. «Real-time trajectory planning for UCAV air-to-surface attack using inverse dynamics optimization method and receding horizon control», 2013 | Представлена модель планирования траектории в реальном времени для типичного беспилотного боевого летательного аппарата, выполняющего автономную атаку класса «воздух-поверхность». Задача планирования траектории атаки математически формулируется как задача оптимального управления с уходящим горизонтом (RHC-ОСР). Для решения RHC-ОСР в реальном времени разработан алгоритм планирования на основе оптимизации задачи обратной динамики |
| Ma Y., Ma X., and Song X. «A Case Study on Air Combat Decision Using Approximated Dynamic Programming», 2014   | Модель воздушного боя «один-на-один» с использованием приближенного динамического программирования  |
| Dong Y., Ai J, Liu J. «Guidance and control for own aircraft in the autonomous air combat: A historical review and future prospects», 2019                               | Обзорная статья по моделированию автономных воздушных боев, даны ссылки на 282 источника  |
| Mao Y., Chen Z., Yang Y., Hu Y. «A novel adaptive heuristic dynamic programming-based algorithm for aircraft confrontation games», 2021                                  | Эвристический алгоритм воздушного боя между двумя самолетами (ударным и перехватчиком) на основе динамического программирования   |
| Ramteke V., Comandur V., Makkapati V. R., Kothari M. «A Game-Theoretic Model for One-on-One Air Combat», 2022  | Представлена теоретико-игровая модель для анализа воздушных боев между двумя однотипными самолетами. Вычисляется равновесие Нэша в области смешанных стратегий. В модели учитывается маневрирование самолетов (создана библиотека маневров: крен элеронов, бочка, петля, набор высоты и пикирование по спирали и др.). Функция выигрыша вычисляется в заданные моменты времени  |

| Работы   | Их краткая характеристика   |
|--|---|
| Zheng Z., Duan H. «UAV maneuver decision-making via deep reinforcement learning for short-range air combat», 2023  | Модель воздушного боя между двумя БПЛА. Принятие решения о маневрировании основано на глубоком обучении с подкреплением   |
| Duan Z. and etc. «Optimal confrontation position selecting games model and its application to one-on-one air combat», 2024   | Рассмотрена теоретико-игровая задача выбора оптимальных позиций в воздушном бою БПЛА «один-на-один»   |
| <b>III. Модели группового воздушного боя</b>   |   |
| Zongxin Y., Ming L., Zongji C., Rui Z. «Mission decision-making method of multi-aircraft cooperatively attacking multi-target based on game theoretic framework», 2016 | Описан метод принятия решений о совместной атаке несколькими самолетами на множество целей. Использован теоретико-игровой подход. Рассмотрен пример моделирования атаки роя БПЛА по объектам ПВО противника   |
| Jia N., Yang Z., Yang K. «Operational Effectiveness Evaluation of the Swarming UAVs Combat System Based on a System Dynamics Model», 2019                              | В статье предлагается метод оценки оперативной эффективности боевой системы – роя БПЛА, основанный на модели системной динамики   |
| Li N., Su Z., Ling H., Karatas M., Zheng Y. «Optimization of Air Defense System Deployment Against Reconnaissance Drone Swarms», 2023                                  | Рассмотрена задача оптимизации развертывания систем ПВО против роя разведывательных БПЛА с использованием генетических алгоритмов   |
| Галяев А. А. и др. «Оптимизация плана перехвата прямолинейно движущихся целей», 2023   | Решена задача предотвращения проникновения прямолинейно движущихся целей на объект прикрытия посредством их перехвата   |
| Wang E. and etc. «MADRL-based UAV swarm non-cooperative game under incomplete information», 2024   | Модель воздушного боя роя БПЛА на основе мультиагентного обучения с подкреплением   |
| <b>IV. Модели уровня воздушной кампании, театра военных действий</b>   |   |
| Ghose D., Krichman M., Speyer J., Shamma J. «Modeling and analysis of air campaign resource allocation: A spatio-temporal decomposition approach», 2002                | Рассматривается модель воздушной операции на уровне ТВД. Первая сторона подавляет ПВО противника и наносит воздушный удар по его наземным войскам. Вторая сторона защищает свои войска мобильными средствами ПВО. Ресурсы распределяются во времени (теоретико-игровая задача) и пространстве (минимизация риска при создании воздушного коридора). Совмещение двух задач выполняется с использованием подхода агрегации/деагрегации. Для демонстрации основных идей проведено несколько имитационных экспериментов |
| Brown G., Carlyle M., Diehl D., Kline J., Wood K. «A two-sided   | Модель противоракетной обороны на ТВД. В базовой модели обороняющийся заранее размещает средства защиты объектов от баллистических ракет с целью  |

| Работы   | Их краткая характеристика   |
|--|---|
| optimization for theater ballistic missile defense», 2005  | минимизации ущерба. Полагается, что атакующему известны позиции ПРО и обе стороны имеют полную информацию о целевых функциях, местах запуска атакующих ракет, ТТХ вооружения и т. д.  |
| Богданов О. А., Смирнов А. А., Ковалев Д. В. «Имитационное моделирование противоборства в воздушно-космической сфере», 2016  | Рассмотрены характеристики имитационного моделирующего комплекса «Селигер», который обеспечивает возможность имитации двустороннего конфликта с учетом системы объектов сторон, группировки объектов воздушно-космической обороны и ударных средств, а также расчет системы показателей, характеризующих эффективность группировки воздушно-космической обороны по отражению удара средств воздушно-космического нападения              |
| Han Q., Pang B., Li S., Li N., Guo P., Fan C., Li W. «Evaluation method and optimization strategies of resilience for air & space defense system of systems based on kill network theory and improved self-information quantity», 2023 | Статья посвящена оценке устойчивости воздушно-космической обороны. Рассматриваются следующие характеристики устойчивости: 1) сетевая командная информационная система – активное реагирование, неуязвимость, адаптируемость, эмерджентность; 2) боевая система – профилактика, надежность, восстановление, гибкость; 3) БПЛА – надежность, быстрота. Авторами используются сетевые модели, нечеткие множества, имитационный эксперимент |

Из вышеприведенного краткого обзора работ можно сделать следующие выводы. Во-первых, в последнее время много внимания уделяется моделированию одиночных и групповых действий БПЛА в воздушном бою (и, как следствие, развитию военных приложений теории дифференциальных игр). Во-вторых, в последние 10-15 лет резко увеличилось количество работ исследователей из Китая. В-третьих, моделирование боевых действий ведется на всех уровнях (операционном, тактическом и стратегическом).

На стратегическом, оперативном и тактическом уровнях большое внимание уделяется разработке критериев и методов (моделей, методик) оценки боевых возможностей формирований авиации и ПВО. Эти критерии и методы нужны не только для расчета потребных сил и средств для выполнения поставленных боевых задач, но также для повышения эффективности применения этих сил и средств, формирования перспективного облика формирований авиации и систем ПВО (ВКО).

### 6.1.2. Критерии и методы оценки боевых возможностей формирований авиации и ПВО

Для истребителей-перехватчиков В. Р. Дуров в [138], следуя теории А. Н. Колмогорова [318], предложил систему показателей эффективности их боевого применения (табл. 6.1.2).

Таблица 6.1.2. Показатели эффективности боевого применения истребителей-перехватчиков

| Условия боевого применения  | Боевая задача                           | Показатель эффективности   |
|---|---|--|
| Одиночная воздушная цель прорывается через систему ПВО  | Сбить цель                              | Вероятность сбития цели  |
| Групповая воздушная цель прорывается через систему ПВО  | Сбить максимально возможное число целей | Математическое ожидание числа сбитых целей   |
|   | Сбить все цели                          | Вероятность сбития всех целей  |
|   | Сбить не менее заданного числа целей    | Вероятность сбития не менее заданного числа целей  |
| Налет в виде случайного потока воздушных целей проходит через рубеж (полосу) ПВО, обороняемый $n$ -канальной системой | Сбить максимально возможное число целей | Математическое ожидание числа сбитых целей на заданном рубеже (в полосе)                                 |
|   |   | Вероятность того, что заняты все $n$ каналов и очередная цель проходит через рубеж (полосу) безнаказанно |

Расчеты показателей эффективности боевого применения истребителей-перехватчиков выполняются с использованием методов теории вероятностей, теории массового обслуживания, теории надежности, теории пространственного поиска и преследования, теории игр, дифференциальных уравнений, законов физики и аэродинамики, методов оптимизации. Работа В. Р. Дурова [138] имеет комплексный характер и в основном посвящена моделям операционного уровня, о чем свидетельствует ее содержание:

- глава 1 – наземное наведение, рубежи перехвата, сближение с целью;
- глава 2 – атака цели, самонаведение ракеты;
- глава 3 – тактико-технические характеристики истребителя-перехватчика;
- глава 4 – оценка боевой эффективности с помощью основных теорем теории вероятностей;

– глава 5 – эффективность наземного наведения, поиска и поражения цели;

– глава 6 – боевая эффективность групповых действий истребителей-перехватчиков (в основном используются методы теории массового обслуживания);

– глава 7 – боевая готовность и надежность;

– глава 8 – задачи оптимизации (многокритериальная оптимизация, линейное программирование, антагонистические игры).

В «Справочнике офицера противовоздушной обороны» сформулированы критерии и показатели тактического и оперативно-тактического уровней [324]. Кратко перечислим эти критерии и используемые методы расчета.

**Боевые возможности радиотехнических войск (РТВ). Зона информации** (совокупность зон обнаружения радиолокационных средств подразделения, представляющая собой область пространства, в которой обеспечивается измерение трех координат, опознавание и определение других тактических характеристик радиолокационных целей) строится по уточненным облетом зонам обнаружения радиолокационных средств подразделения. Воздействие активных помех на зону информации подразделения учитывается через коэффициент сжатия и сектор эффективного подавления зон обнаружения этого подразделения.

**Информационные возможности** командных пунктов РТВ зависят от информационных возможностей входных информационных каналов этих пунктов и возможностей по обработке и выдаче информации самих пунктов (технических устройств и боевого расчета). Информационные возможности канала информации, оцениваемые количеством одновременно сопровождаемых целей при заданной дискретности, определяются информационной способностью составляющих этот канал звеньев.

**Боевые возможности подразделений и частей истребительной авиации ПВО (ИА ПВО).** Эти боевые возможности характеризуются вероятностными, пространственными и временными показателями. Знание показателей боевых возможностей позволяет командиру принимать обоснованное решение на боевые действия, ставить им реальные боевые задачи и наиболее эффективно использовать их в ходе боевых действий.

К основным показателям отнесены:

– математическое ожидание числа уничтоженных воздушных целей;

– пропускная способность системы наведения истребителей на цели;

- потребный наряд истребителей для уничтожения одиночных и групповых воздушных целей;
- область боевого воздействия, представляющая собой область пространства, в пределах которой возможно уничтожение воздушного противника;
- рубежи ввода истребителей в бой и рубежи подъема истребителей;
- время вылета группы истребителей, время подготовки группы истребителей к первому и повторному вылетам;
- боевое напряжение (характеризуется количеством боевых вылетов на экипаж, подразделение, часть в определенный период времени), а также время выполнения подразделением (частью) боевой задачи.

Для расчета названных показателей используются аналитические и графо-аналитические методы, теория вероятностей, теория массового обслуживания.

А. В. Шлыков и С. В. Прищеп предлагают дополнить систему оценки возможностей группировок войск ПВО на оперативном уровне следующим показателем [376] – соотношение потерь средств воздушного нападения и средств противовоздушной обороны.

В. Барвиненко и Ю. Аношко рассмотрели возможности моделирующих комплексов и предложили систему критериев и показателей оценки эффективности борьбы с воздушно-космическим противником [38].

*Показатели и критерии стратегического уровня.* Сдерживание агрессии против страны обеспечивается возможностью нанесения противнику неприемлемого ущерба. Под неприемлемым ущербом авторы понимают уровень потерь государства или коалиции, терпеть которые руководство государства (коалиции) несогласно даже ценой своей формальной победы в войне или конфликте. Этот ущерб предлагается оценивать методом экспертных оценок. Основным показателем предлагается считать: 1) увеличение времени, необходимого руководству страны для принятия решения о нанесении ответно-встречного или ответного удара; 2) сохраненное количество ударных средств, необходимых для нанесения неприемлемого ущерба противнику.

*Показатели и критерии оперативного уровня.* Основные формы борьбы с воздушным противником на оперативном уровне – воздушная операция на стратегическом направлении (ТВД) и боевые действия объединения ПВО-ПРО. Показатели и критерии для оценки их эффективности выбираются исходя из целей и задач и соответственно из содержания действий войск (сил) ПВО, авиации, ракетных войск и артиллерии, флота, разведки, РЭБ и др. В

качестве основного показателя эффективности предлагается использовать соотношение боевых потенциалов сил воздушного нападения и ПВО сторон.

Эффективность борьбы за завоевание (удержание) господства в воздухе предлагается оценивать соотношением боевых потенциалов сил авиации и ПВО, а также степенью предотвращенного ущерба.

*Показатели и критерии тактического уровня.* Д. Михальски и А. Радомыски при выполнении расчетов по оценке эффективности ПВО на тактическом уровне используют характеристики уровней противовоздушной обороны [525] (табл. 6.1.3).

Таблица 6.1.3. Характеристика уровней противовоздушной обороны

| Коэффициент эффективности ПВО | Степень эффективности ПВО | Ожидаемый результат   |
|-------------------------------|---------------------------|---|
| 30% и более                   | Очень сильная             | Уничтожение воздушных сил противника в первый день воздушной операции |
| 20 – 29%                      | Сильная                   | Прекращение воздушных операций в течение 2-3 дней                     |
| 10 – 19%                      | Средняя (достаточная)     | Поддержание статус-кво в воздушном пространстве                       |
| Менее 10%                     | Недостаточная             | Завоевание противником господства в воздушном пространстве            |

Содержание таблицы не противоречит положениям военной науки (см. [342]) и справедливо для пилотируемой авиации. Обоснование и назначение критериев и требуемых степеней поражения беспилотных средств и смешанных группировок противника является актуальной научной задачей.

Министерство обороны США определяет *превосходство в воздухе* как такую степень доминирования в воздушном бою одной стороны, которая позволяет ей проводить операции в данное время и в данном районе без запретительного вмешательства ракетными и воздушными угрозами второй стороны [444].

Например, успех операции «Буря в пустыне» 1991 г. во многом объясняется использованием ВВС США воздушных и других средств разведки для вскрытия объектов ПВО и ВВС армии Ирака, истребителей 4-го поколения с высокоточным оружием и других передовых систем [464]. Ход и результаты этой операции, в частности, подтвердили правильность системы советских критериев и показателей эффективности ПВО [324].

### 6.1.3. Сценарно-имитационные подходы и решения по проектированию состава и тактики ВКО и ВВС

В работах [53; 400] описаны возможности комплекса математических моделей (КММ) «Селигер», реализующего имитацию двустороннего конфликта, в котором учитываются системы объектов сторон, их группировки ПВО и ударных средств (рис. 6.1.3).

КММ «Селигер» должен обеспечивать решение широкого круга задач, связанных с получением количественных оценок эффективности группировок ВКО оперативно-стратегического уровня [400]:

- обоснование направлений развития системы вооружения воздушно-космической обороны (ВКО);
- обоснование планов строительства системы ВКО;
- проведение расчетов в интересах мероприятий оперативной подготовки: военных игр, командно-штабных и войсковых учений.



СН – стратегическое направление, КШУ – командно-штабные учения

Источник: <http://www.vko.ru/koncepcii/imitacionnoe-modelirovanie-vko-iskusstvo-i-nauka>

Рис. 6.1.3. Функциональная схема КММ «Селигер»

Ядром КММ является модель боевых действий группировки ПВО по отражению удара средств воздушного нападения (СВН). Модель является имитационной, и в ней воспроизводится динамика изменения пространственно-временной картины развития боевых действий.

В составе удара СВН могут моделироваться аэродинамические летательные аппараты различных классов, а также баллистические нестратегические ракетные средства нападения. В составе группировки ВКО имитируются подсистемы разведки и предупреждения о воздушно-космическом нападении, поражения и подавления сил и средств воздушно-космического нападения, управления. Проблема адекватности модели решается на основе ее структурно-функционального подобия реальной системе и калибровки частных моделей ее элементов и подсистем на детальными моделях более низкого иерархического уровня [400].

Основными показателями, характеризующими эффективность группировки ВКО по отражению удара СВН являются:

- математическое ожидание числа уничтоженных целей каждого типа из состава удара средствами ВКО различных типов;
- ожидаемые потери обороняемых объектов и средств группировки ВКО.

Комплекс «Селигер» поддерживает работу должностных лиц на этапе подготовки и этапе ведения боевых действий.

На этапе подготовки решается задача усиления группировки мирного времени в районе конфликта средствами ПВО и/или ударной авиации в следующей последовательности:

- расчет степени превосходства одной из сторон над другой и потребности в средствах ПВО и/или ударной авиации (модель для определения соотношения сил);
- на основе полученных показателей ЛПР определяет состав сил ВКО, привлекаемых для усиления исходной группировки с учетом располагаемого времени, и распределяет истребительную авиацию по аэродромам базирования и средства зенитно-ракетного вооружения по объектам.

На этапе ведения боевых действий используются модели: 1) прогнозирования распределения СВН противника по воздушным направлениям и рубежам боевых действий; 2) вскрытия направления главного удара (НГУ) СВН противника; 3) сосредоточения усилий на НГУ и определения рационального варианта маневра силами, огнем и ударами.

На операционном уровне представителями Минобороны совместно с промышленностью разработаны полунатурные модели прогнозирования уязвимостей, эффективной площади рассеивания, оптической заметности существующих и перспективных летательных аппаратов.

Военно-воздушные силы решают комплекс разнородных задач по завоеванию господства в воздухе, нанесению ударов по целям на переднем крае и в глубине обороны противника (включая поражение средств

ВКО/ПВО). На вооружении ВВС ряда государств находятся как новые и малозаметные истребители и бомбардировщики, так и самолеты предыдущих поколений.

Новые технологические возможности привели к созданию широкого спектра беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для решения разнообразных задач. Среди БПЛА выделяется класс «боевых самолетов совместного действия»<sup>1</sup> (collaborative combat aircraft, CCA), которые могут действовать совместно с другими летательными аппаратами в условиях противоборства. Этот самолет должен быть полуавтономным, способным принимать указания высокого уровня от летчика, а затем автономно выполнять эти указания.

Заслуживает внимания подход к организации и проведению сценарных военных игр (см. также раздел 2.4) с участием представителей армии и промышленности США, экспертов и исследователей из института Митчелла (см. работу М. А. Ганзингера, Л. А. Статзрима и Б. Свитмана [464]).

Цель военных игр – сформулировать концепцию развития ВВС США в условиях ограниченного военного бюджета.

*Сценарий № 1. Использование CCA для завоевания превосходства в воздухе.* Успех решения поставленной задачи основан на использовании в течение первых дней большого количества одноразовых и восстанавливаемых CCA в качестве передовых сил подавления, дезориентации и нарушения функционирования ПВО противника. Сценарий разделен на тактические фазы с подробными планами действий сторон.

*Сценарий № 2. Использование CCA для подавления важных целей противника.* В первой фазе разнотипные CCA должны запускаться с бортов стратегических бомбардировщиков В-52 и наземных аэродромов с целью вскрытия системы ПВО противника. Полученная информация будет использоваться во второй фазе для уничтожения вскрытых объектов. Атака должна начаться в момент, когда у истребителей ПВО противника, реагирующих на первую волну атаки, заканчивалось топливо. Во второй волне будет использоваться еще большее количество CCA в сочетании с истребителями 5-го поколения. На всех этапах боя CCA рассредоточены по нескольким базам, что осложняет их обнаружение и поражение.

*Сценарий № 3. Использование CCA для подавления/уничтожения ПВО противника.* На первом этапе БПЛА типа MQ-9 Reaper используются для обнаружения наземных, надводных и воздушных радаров противника, а также CCA со средствами РЭБ. Истребители совместно с CCA других типов

---

<sup>1</sup> Средство второго горизонта по Х. Джордану.

использовались для уничтожения выявленных целей. Как и в других сценариях, между воздушными средствами ВВС США связь и обмен информацией обеспечивается бортовыми ретрансляторами.

При построении сценариев и в ходе военной игры использовались графоаналитические методы, тактические расчеты (например, для обеспечения непрерывной ротации самолетов в воздухе треть самолетов выполняет боевые задачи, еще треть возвращается на свои авиабазы, оставшаяся треть готовится к вылету), модели, отражающие боевые возможности самолетов, и расчеты по видам боевого и материально-технического обеспечения.

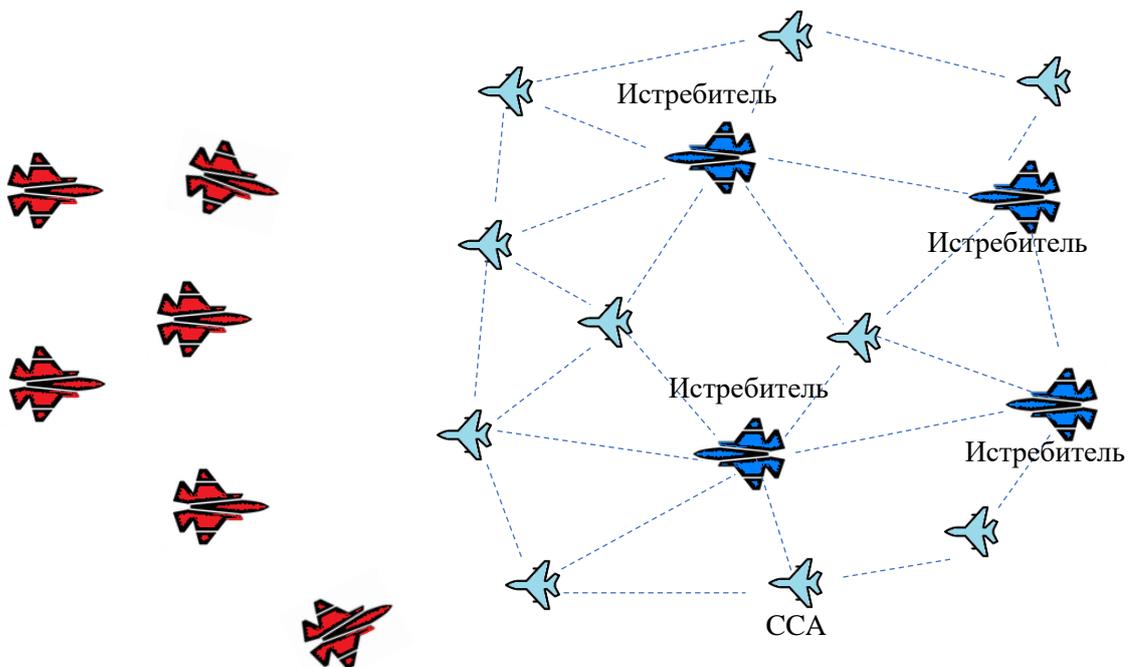
По результатам проведенной военной игры получены следующие выводы [464].

Первый. ССА могут повысить способность ВВС проецировать «массовое» превосходство в воздухе.

Второй. Применение ССА совместно с боевыми самолетами позволит существенно увеличить боевые возможности последних и повысить их живучесть.

Третий. ССА позволяют расширить концепции ПВО ВВС за счет создания разнообразных комбинаций пилотируемых и беспилотных сил. Применение разнородных сил усложняет способность противника понять природу угрозы и быстро принять эффективные меры противодействия.

Четвертый. Применение ССА может повысить живучесть боевых самолетов (рис. 6.1.4).



Gunzinger M. A., Stutzriem L. A., Sweetman B. The Need for Collaborative Combat Aircraft for Disruptive Air Warfare

Рис. 6.1.4. Сеть совместного применения разнородных сил

Эксперты и военные аналитики отмечают, что ССА – это больше, чем дополнение к пилотируемым самолетам, приводя множество исторических примеров. В частности, в 1930-е гг. Франция и Германия имели на вооружении примерно одинаковое количество современных танков и другой бронетехники. Франция планировала использовать танки в качестве мобильной артиллерийской поддержки своей пехоты и защиты линии Мажино, не формируя соединения для нанесения контрударов по вклинившимся в оборону механизированным соединениям противника. Тогда как Германия осознавала потенциал массированного применения бронетанковых сил для проведения быстрых и мобильных операций.

Исходя из анализа боевых действий, военных игр и известных моделей боевых действий в воздухе, на рис. 6.1.5 представлена схема проектирования воздушных (противовоздушных) сил и их применения (вариант).

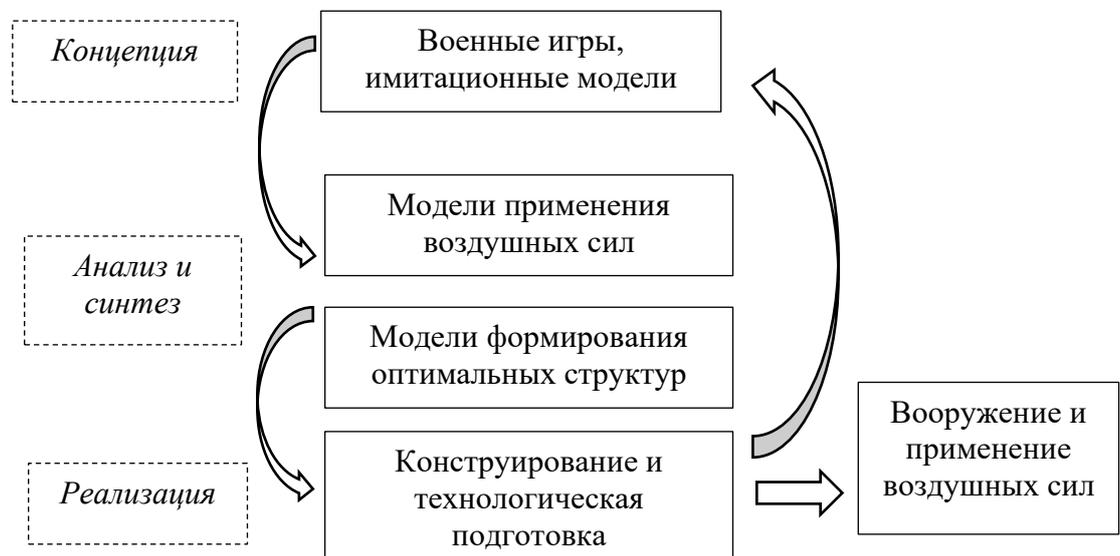


Рис. 6.1.5. Схема проектирования воздушных (противовоздушных) сил и их применения

Таким образом, моделирование боевых действий существующих и перспективных авиационных систем преследует следующие цели: формирование перспективного облика авиационных сил и средств, оптимизация применения авиационных формирований и систем, обоснование тактико-технических заданий на производство авиационных систем (систем ПВО/ВКО).

Повышение эффективности моделирования боевых действий в воздухе обеспечивается как комплексным применением различных теорий и методов моделирования, так взаимодействием специалистов по моделированию с военными и техническими экспертами, представителями министерства обороны и промышленности.

## 6.2. Теоретико-вероятностные модели боевых действий в воздухе

Теоретико-вероятностные модели относятся к классу описательных моделей и выполняют дескриптивную функцию (см. раздел 1.3.2 и [575, с. 3]). Эти модели применяются для установления статистических закономерностей исследуемых процессов, изучения вероятных путей их развития в неизменных условиях или в отсутствии внешних воздействий. Они отвечают на вопросы: как устроен объект, как протекает процесс, каким образом, при каких условиях происходит явление [58]. Иногда, в редких ситуациях, когда неопределенность ограничена и четко определена, а модель подкреплена достаточным количеством достоверных данных, описательные модели также могут использоваться для прогнозирования исходов боевых действий [575].

Поскольку процессы боя имеют стохастический характер, то для их описания применяются теория вероятностей и математическая статистика. Есть несколько причин популярности и эффективности теоретико-вероятностных методов описания боевых действий [575].

Во-первых, существует множество явлений, никак не связанных друг с другом в практическом смысле, т. е. независимых, что делает математический аппарат достаточно простым.

Во-вторых, в силу ограниченности дисперсий и математических ожиданий многих распределений, описывающих боевые действия, вероятностная неопределенность эффективно устраняется использованием математических ожиданий (медиан).

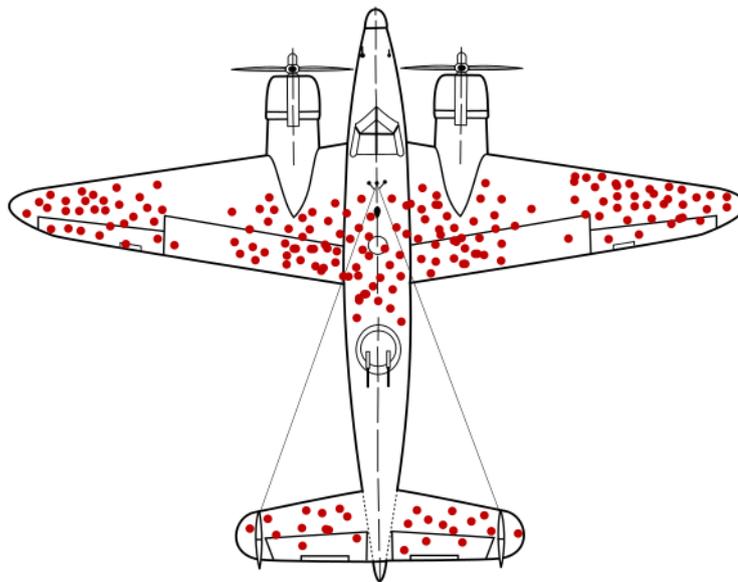
Вместе с тем, исследователям не стоит забывать, что многие процессы зависимы (или не стационарны) и учитывать это при построении моделей и анализе результатов.

Наиболее часто при моделировании процессов боя используются следующие распределения: равномерное, Бернулли (два исхода, успех или неуспех), биномиальное (независимые испытания с одной и той же эффективностью, при большом количестве реализаций переходящее в распределение Пуассона или нормальное), экспоненциальное (отсутствие последствий) и нормальное (распределение Гаусса, хорошее приближение для суммы большого числа независимых случайных величин с ограниченной дисперсией).

Приведем содержательные примеры использования распределений случайных величин (их формальное описание можно найти в учебных пособиях по теории вероятностей, например, в [81; 366]).

*Равномерное распределение.* В [452] описана так называемая «систематическая ошибка выжившего» (или просто ошибка выжившего) – разновидность систематической ошибки отбора, когда по одной группе объектов (условно называемых «выжившие») данных много, а по другой («погибшие») – практически нет.

Например, в годы Второй мировой войны командование американских и британских ВВС поручило математику и статистику А. Вальду выяснить, какие части фюзеляжа самолета нужно защитить дополнительной броней. Не все бомбардировщики возвращались на базу. А на тех, что возвращались, оставалось множество пробоин от зенитной артиллерии и истребителей, но распределены они были неравномерно: больше всего на фюзеляже и прочих частях, меньше в топливной системе и намного меньше – в двигателе (рис. 6.2.1). Значило ли это, что в пробитых местах нужно больше брони? А. Вальд ответил: нет, исследование как раз показывает, что самолет, получивший пробоины в таких местах, еще может вернуться на базу. Самолет, которому попали в двигатель или топливный бак, выходит из строя и не возвращается. Поскольку попадания от вражеского огня в первом приближении *распределены равномерно*, укреплять надо те места, которые у вернувшихся в массе наиболее «чистые», без пробоин.



Источник: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b2/Survivorship-bias.svg>

Рис. 6.2.1. Пробоины на вернувшихся с боевых заданий самолетах

*Распределение Бернулли и биномиальное распределение.* Для всех видов оружия проводились<sup>1</sup> и проводятся испытания по проверке их ТТХ и боевых возможностей. Один из важнейших показателей оружия – вероятность поражения цели (или требуемое количество выстрелов для ее поражения) в определенных условиях (см. раздел 3.2.1). Зная вероятность поражения цели одним выстрелом (распределение Бернулли), можно найти вероятность ее поражения несколькими независимыми выстрелами из оружия одного типа (биномиальное распределение, схема независимых испытаний с одной и той же вероятностью «успеха»).

Рассмотрим *пример*. Вероятность попадания в бронированную цель одной ракетой ПТРК равна  $p = 0,8$ , а вероятность ее поражения в случае попадания –  $\pi = 0,3$ . Вычислить ожидаемое количество попаданий в цель при стрельбе по ней ракетами. С вертолета по цели производится залп пятью ракетами,  $n = 5$ . Найти вероятность поражения цели по результатам залпа. Сколько требуется ракет для поражения цели с вероятностью 0,8?

Предварительно найдем ожидаемые количества попаданий в цель, используя вероятности для вычисления ровно  $m$  попаданий при  $n$  выстрелах

$$P_{m,n} = C_n^m p^m (1-p)^{n-m}$$

(число сочетаний  $C_n^m = \frac{n!}{(n-m)!m!}$  показывает, сколькими способами достигается  $m$  попаданий) и запишем их в виде таблицы:

| $m$       | 0       | 1      | 2      | 3      | 4      | 5       |
|-----------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|
| $P_{m,n}$ | 0,00032 | 0,0064 | 0,0512 | 0,2048 | 0,4096 | 0,32768 |

Из таблицы видно, что вероятность промаха по цели ничтожно мала ( $P_{0,5} = 0,00032$ ), а вероятность ровно 4-х попаданий равна  $P_{4,5} = 0,4096$ .

Для биномиального распределения математическое ожидание числа попаданий в цель вычисляется по формуле  $M = n p$  и равно 4. Тогда вероятность поражения цели при стрельбе по ней залпом будет равна (вычисляем через противоположное событие – вероятность непоражения при всех выстрелах)

$$P_{\pi} = 1 - (1 - \pi)^M \approx 0,76.$$

<sup>1</sup> Схема и примеры расчета бомб для поражения наземных целей бомбардировщиком описаны в статье «Бомбардирование воздушное» (см. Советская военная энциклопедия. Том 2. Аэродромная служба – Варта. – М.: Советская энциклопедия, 1933, столбцы 603-637).

Из последнего выражения находим требуемое  $M$  для получения  $P_\pi = 0,8$

$$M = \frac{\ln(1 - P_\pi)}{\ln(1 - \pi)} \approx 4,5.$$

Поскольку можно выпустить по цели только целое число ракет, то для уничтожения цели (ее поражения с вероятностью не ниже 0,8) потребуется пустить по ней 5 ракет.

*Нормальное распределение* (распределение Гаусса) используется при анализе погрешностей измерений, отклонений при стрельбе и во всех ситуациях, где есть основания считать, что рассматриваемая случайная величина является суммой многих случайных слабо взаимодействующих величин, каждая из которых вносит малый вклад относительно общей суммы. Плотность вероятности нормального распределения

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (6.2.1)$$

где:  $a$  – математическое ожидание,  $\sigma$  – среднеквадратическое (стандартное) отклонение.

Известно «правило трех сигм»: с крайне высокой вероятностью случайная величина не отклонится от своего математического ожидания (среднего значения) более, чем на  $3\sigma$ . Для нормального распределения с вероятностью 0,9973 все значения случайной величины лежат в интервале  $(a - 3\sigma, a + 3\sigma)$ .

В расчетах с использованием нормально распределенной случайной величины используется так называемая *функция Лапласа* (она затабулирована и реализована в электронных таблицах)

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt. \quad (6.2.2)$$

Тогда вероятность попадания нормально распределенной случайной величины на интервал  $(\alpha, \beta)$  равна:

$$p(\alpha < X < \beta) = \Phi\left(\frac{\beta - a}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - a}{\sigma}\right). \quad (6.2.3)$$

Для системы двух независимых случайных величин  $X$  и  $Y$ , распределенных по нормальному закону, вероятность попадания случайной точки в прямоугольник  $R$  (рис. 6.2.2) с осями, параллельными главным осям рассеивания, выражается по формуле

$$p((X, Y) \in R) = \left[ \Phi\left(\frac{\beta - a_x}{\sigma_x}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - a_x}{\sigma_x}\right) \right] \left[ \Phi\left(\frac{\delta - a_y}{\sigma_y}\right) - \Phi\left(\frac{\gamma - a_y}{\sigma_y}\right) \right], \quad (6.2.4)$$

где:  $a_x$  и  $a_y$  – математические ожидания случайных величин  $X$  и  $Y$ ;  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – их стандартные отклонения.

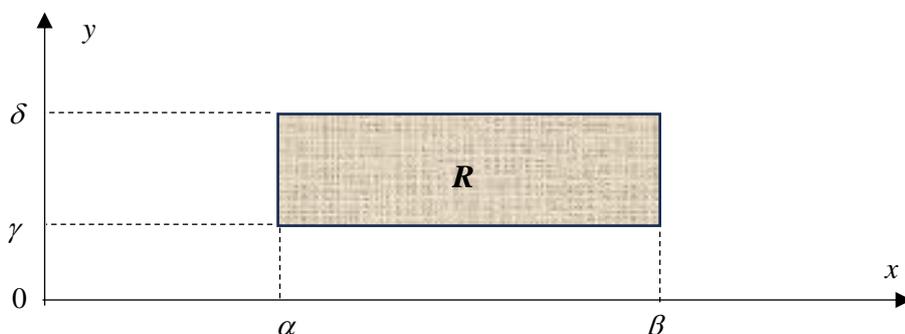


Рис. 6.2.2. Площадная цель в форме прямоугольника

Рассмотрим *пример*. Защищенная цель имеет размер по фронту  $R_x = 20$  м и в глубину  $R_y = 10$  м. Прицеливание выполняется по центру цели. Стандартные отклонения для корректируемой бомбы равны  $\sigma_x = 10$  м и  $\sigma_y = 15$  м. Найти вероятность попадания бомбы в цель.

Совместим левый нижний угол цели с началом координат. Тогда  $\alpha = 0$  м,  $\beta = 20$  м,  $\gamma = 0$  м,  $\delta = 10$  м,  $a_x = 10$  м,  $a_y = 5$  м и

$$p((X, Y) \in R) = \left[ \Phi\left(\frac{20-10}{10}\right) - \Phi\left(\frac{-10}{10}\right) \right] \left[ \Phi\left(\frac{10-5}{15}\right) - \Phi\left(\frac{-5}{15}\right) \right] \approx 0,18.$$

К числу немногих плоских фигур, вероятность попадания в которые может быть вычислена в явной форме, принадлежит эллипс рассеивания  $B_k$ , уравнение которого

$$\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} = k^2,$$

где  $k$  – параметр.

Тогда вероятность попадания случайной точки в эллипс рассеивания, полуоси которого равны  $k$  стандартным отклонениям, равна [81]:

$$p((X, Y) \in B_k) = 1 - \exp(-k^2 / 2). \quad (6.2.5)$$

Формула (6.2.5) применяется для вычисления вероятности попадания в круг при круговом рассеивании.

**Пример.** На пути движущегося БТР противника площадью  $S=5 \text{ м}^2$  вертолетом (авиационными средствами поражения) формируется осколочное поле в виде плоского диска радиуса  $R=30 \text{ м}$  (рис. 6.2.3). Внутри диска плотность осколков постоянна и равна  $d=2 \text{ оск./м}^2$ . Для поражения цели необходимо попадание в нее в среднем  $\omega=5$  осколков. Определить вероятность поражения цели  $P(A)$  при  $\sigma=20 \text{ м}$ .

Решение. Для поражения цели необходимо совмещение двух событий: 1) попадание цели (точки 0) в осколочное поле (круг радиуса  $R$ ) и 2) поражение цели при условии ее попадания в круг.

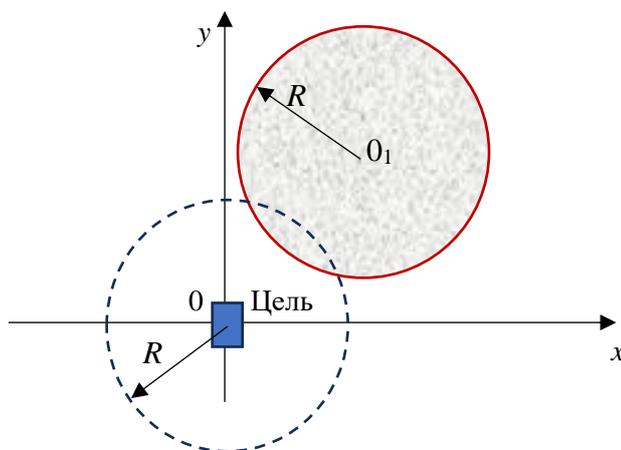


Рис. 6.2.3. Схема поражения цели осколками

Вероятность попадания цели в круг равна вероятности того, что центр круга (случайная точка  $O_1$ ) попадет в круг радиуса  $R$ , описанный вокруг начала координат. По формуле (6.2.5) и при  $k = R/\sigma = 30/20 = 1,5$  получим

$$p = 1 - \exp(-1,5^2 / 2) \approx 0,675.$$

Далее найдем условную вероятность  $p^*$  поражения цели при условии, что она накрыта осколочным полем. Воспользуемся законом поражения Колмогорова (4.1.4) с параметром  $\alpha = -\ln(1 - 1/\omega) \approx 0,41$ . Ожидаемое количество попаданий в цель равно  $m = dS = 10$  осколков. Тогда

$$p^* = 1 - \exp(-\alpha m) \approx 0,89.$$

Следовательно, вероятность поражения БТР равна

$$P(A) = pp^* \approx 0,61.$$

Если полученное значение вероятности не устраивает, следует применять или более мощные боеприпасы или повысить точность поражения цели (что в условиях примера более предпочтительно, так как  $p < p^*$ ).

В последние десятилетия для описания сложных природных и социальных явлений используются степенные распределения (распределение Парето, степенной закон, см. также раздел 3.2).

Далее рассмотрим военные приложения следующих разделов теории вероятностей: теории поиска, теории массового обслуживания и теории надежности.

### 6.2.1. Теория поиска и ее применение при моделировании боевых действий

Теория поиска объектов ведет отсчет с работ Б. Купмана [502] и к настоящему времени сложилась как самостоятельная научная область. Первоначально теория поиска развивалась преимущественно для военных целей, в последующем методы этой теории стали успешно применяться во многих сферах, включая борьбу с терроризмом, рыболовство, спасательные операции и т. д. Хрестоматийными работами в этой области являются книги В. А. Абчука, В. Г. Суздаля [7] и О. Хеллмана [356]. Обзор современных исследований можно найти в [3; 354]. В работе [354] отмечается, что, несмотря на широкие приложения теории поиска, проблематика управления поисковыми операциями остается малоисследованной.

Теория поиска тесно связана как с рядом разделов математики (дифференциальные игры, теория графов, оптимальное управление и др.), так и с инженерными и техническими дисциплинами (обработка сигналов, решение задач обнаружения, идентификации, распознавания, навигации и др.).

Следуя [7], рассмотрим некоторые *положения классической теории поиска* на плоскости. Пусть имеется область поиска на суше или водной поверхности, в которой могут находиться один или несколько, подвижных или неподвижных *объектов*. Для их поиска привлекается одно или несколько воздушных средств (самолетов, вертолетов, БПЛА и т. д.), обычно называемых «*наблюдателями*» (рис. 6.2.4).



Рис. 6.2.4. Схема поиска объектов

*Область поиска* может быть любой формы. Если воздушный поиск объектов ведется на суше, то на схему следует нанести условно-графические обозначения дорог, строений, леса и т. д. Возможно потребуется разделить область поиска на районы, чтобы учесть в каждом из них особенности маскировки объектов. Поиск может вестись днем, ночью, в различных погодных условиях и с использованием различных физических полей (в оптическом, инфракрасном, радиодиапазоне и т. д.). В зависимости от условий поиск может вестись «гребенкой», «параллельным галсированием», «расширяющимся квадратом», «заданным маршрутом», «контурным поиском» и т. д.

Воздушный поиск имеет ряд преимуществ по сравнению с наземным: относительно малое влияние рельефа местности на результат поиска и большая скорость поисковых действий.

Возможности наблюдателей характеризуются, прежде всего, их скоростью поиска и ожидаемой дальностью обнаружения объекта (зависит от высоты полета и типа объектов поиска).

С целью получения количественных характеристик поисковых действий вероятностную неопределенность обычно устраняют следующими способами.

*1-й способ.* Вместо случайных возможностей наблюдателей (скорость и дальность обнаружения объектов) используются их математические ожидания (для конкретного типа объектов поиска и для всей области или ее части). Например, если объект попадает в круг радиуса  $r$ , описанный вокруг наблюдателя, то он считается достоверно обнаруженным.

*2-й способ.* Если область поиска существенно разнородна, то она или разбивается на отдельные районы, или устранение неопределенностей выполняется экипажем (т. е. на операционном уровне) за счет выбора рациональных скоростей, высот и маршрутов полета.

*3-й способ.* Поиск представляется как случайный марковский процесс (см. раздел 4.1). Применительно к проблематике поиска это означает следующее: если система «наблюдатели – объекты поиска» в момент времени  $t$  находится в состоянии  $A$ , то вероятность любого состояния системы в будущем (в момент  $t + \Delta t$ ) зависит только от ее состояния в настоящем и не зависит от того, когда и каким образом система перешла в это состояние.

В большинстве моделей поиска переход системы из одного состояния в другое может осуществляться в любые моменты времени, что дает основание считать поиск марковским процессом с непрерывным временем.

Положим, что объект поиска один и введем понятие *интенсивности потока обнаружений* или *интенсивности поиска*  $\gamma$  (в терминах марковских

процессов – плотность потока событий) – среднего числа обнаружений в единицу времени.

Если поиск ведется одним наблюдателем с круговым обзором в радиусе  $r$  и считается, что в случае попадания объекта в круг наблюдения он обнаружен, то интенсивность поиска вычисляется по формуле (для простейшего потока событий)

$$\gamma = \frac{2rv}{S}, \quad (6.2.6)$$

где:  $v$  – скорость наблюдателя,  $S$  – площадь области поиска.

Разобьем время поиска  $t_{\Pi}$  на  $n$  равных элементарных интервалов  $\Delta t = t_{\Pi}/n$ . Математическое ожидание числа обнаружений, приходящихся на отрезок времени  $\Delta t$ , равно  $\gamma\Delta t$ . Для простейшего потока событий в силу его ординарности и при наличии одного объекта поиска вероятностью двух и более обнаружений на малом интервале времени можно пренебречь. Поэтому вероятность только одного обнаружения за время  $\Delta t$  можно считать приближенно равной  $\gamma\Delta t$ . В силу независимости отдельных обнаружений вероятность  $P_{m,n}$  того, что среди  $n$  интервалов времени обнаружения будут иметь место ровно на  $m$  интервалах, равна (биномиальное распределение)

$$P_{m,n} = C_n^m p^m (1-p)^{n-m} = C_n^m \left(\frac{\gamma t_{\Pi}}{n}\right)^m \left(1 - \frac{\gamma t_{\Pi}}{n}\right)^{n-m}. \quad (6.2.7)$$

Тогда в силу ординарности потока обнаружений вероятность получения  $m$  обнаружений объекта за время поиска равна

$$P_m = \lim_{n \rightarrow \infty} C_n^m \left(\frac{\gamma t_{\Pi}}{n}\right)^m \left(1 - \frac{\gamma t_{\Pi}}{n}\right)^{n-m}. \quad (6.2.8)$$

Опуская промежуточные выкладки, для простейшего потока обнаружений получим

$$P_m = \frac{(\gamma t_{\Pi})^m}{m!} e^{-\gamma t_{\Pi}}. \quad (6.2.9)$$

Здесь  $U = \gamma t_{\Pi}$  – среднее число обнаружений одного объекта поиска за время поиска  $t_{\Pi}$ , называемое *поисковым потенциалом* (для стационарного пуассоновского потока).

Из (6.2.9) легко находится вероятность  $P_{m \geq 1}$  хотя бы одного обнаружения за время поиска  $t_{\Pi}$ , называемая просто вероятностью обнаружения объекта поиска

$$P_{об} = P_{m \geq 1} = 1 - e^{-\gamma t_{\Pi}}. \quad (6.2.10)$$

Учитывая свойства экспоненциального распределения, математическое ожидание времени поиска равно

$$M[t] = \frac{1}{\gamma}. \quad (6.2.11)$$

Если наблюдателей несколько, то их возможности учитываются следующими способами.

*1-й способ.* Наблюдатели ведут поисковые действия без пересечения маршрутов поиска (или этими пересечениями можно пренебречь при расчете интенсивности  $\gamma$ ). Тогда интенсивность поиска с учетом всех наблюдателей вычисляется по формуле:

$$\gamma_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \gamma_i = \frac{2}{S} \sum_{i=1}^N r_i v_i, \quad (6.2.12)$$

где:  $N$  – количество наблюдателей;  $\gamma_i$ ,  $v_i$  и  $r_i$  – поисковые характеристики  $i$ -го наблюдателя. В случае пересечения маршрутов наблюдателей надо убрать часть пересекающихся областей.

Тогда вероятность обнаружения объекта несколькими наблюдателями будет равна

$$P_{\Sigma} = 1 - e^{-\gamma_{\Sigma} t_n}. \quad (6.2.13)$$

Если наблюдатели однородны (имеют одинаковые поисковые возможности), то получим

$$P_{\Sigma} = 1 - e^{-n\gamma t_n}. \quad (6.2.13^*)$$

*2-й способ.* Разделить область поиска на районы, по одному для каждого наблюдателя. Площади непересекающихся районов назначить с учетом поисковых возможностей наблюдателей. Для однородных наблюдателей получим выражение (6.2.13\*).

*3-й способ.* Сделать допущение, что поисковые действия нескольких наблюдателей независимы и рассчитать вероятность обнаружения объекта хотя бы одним наблюдателем

$$P_N = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{оbi}), \quad (6.2.14)$$

где  $P_{оbi}$  – вероятность обнаружения объекта  $i$ -м наблюдателем.

Рассмотренные выше выражения получены при следующих допущениях: 1) объект поиска один, 2) среда неконфликтна (противник не противодействует нашим поисковым усилиям).

Положим, что в области поиска находятся  $k$  однородных объектов. Тогда с достаточной для большинства практических задач точностью можно исполь-

зывать критерий – математическое ожидание количества обнаруженных объектов

$$m_k = kP_{\Sigma}. \quad (6.2.15)$$

С особенностями поисковых задач на графах и поиском с противодействием (убегающий может уничтожить одного из участников группы поиска, тем самым обнаружив себя, после чего преследование продолжается в уменьшенном составе) можно ознакомиться в [3].

Для построения моделей воздушного поиска в конфликтной среде, с разнородными объектами поиска и в существенно неоднородной области применяются методы имитационного моделирования (см. раздел 5.1), а также оптимизационные методы и методы теории игр.

Рассмотрим *пример*. Объект поиска находится в области площадью  $S = 100 \text{ км}^2$ . Разведывательный летательный аппарат (наблюдатель) способен обнаружить объект в радиусе  $r = 1 \text{ км}$ . Скорость наблюдателя равна  $v = 100 \text{ км/час}$ . Найти: 1) вероятность обнаружения объекта одним наблюдателем за время поиска  $t_{\Pi} = 1 \text{ час}$ ; 2) необходимое количество однотипных наблюдателей, обеспечивающих обнаружение объекта за время поиска с вероятностью не ниже 0,95.

По формулам (6.2.6) и (6.2.10) находим

$$P_{об} = 1 - \exp\left(-\frac{2rvt_{\Pi}}{S}\right) \approx 0,86.$$

Из формул (6.2.6) и (6.2.13\*) получим

$$k = \frac{-S \ln(1 - 0,95)}{2rvt_{\Pi}} \approx 1,5.$$

Поскольку количество наблюдателей не может быть дробным, результат округляем в большую сторону. Таким образом, для обнаружения объекта при воздушном поиске с требуемой вероятностью не ниже 0,95 за время поиска 1 час, необходимо привлечь два разведывательных ЛА.

Модели воздушного поиска могут быть элементами более сложных и комплексных моделей, в которых решаются задачи поиска, обнаружения, идентификации объектов, их сопровождения и наведения на них средств поражения.

Связанной логически с теорией оптимального поиска и распознавания объектов является проблема оценки возможностей по поражению противника (отражению удара средствами ПВО/ВКО). Одним из способов решения указанной проблемы является применение теории массового обслуживания.

### 6.2.2. Теория массового обслуживания и ее применение при моделировании боевых действий

*Теория массового обслуживания* (или теория очередей – англ. queueing theory) – это раздел теории вероятностей, изучающий потоки требований (заявок), поступающие в системы обслуживания и выходящие из них, длительности ожидания начала обслуживания, длины очередей и другие характеристики систем обслуживания. Целью исследований является рациональный выбор структуры системы и процесса обслуживания [58].

На первичное развитие этой теории особое влияние оказали работы датского ученого и сотрудника телефонной компании А. К. Эрланга. В последующем выяснилось, что задачи массового обслуживания возникают не только в телефонии, но и во многих других направлениях: в военном деле, в технике, на транспорте и т. д. Значительный вклад в создание и разработку общей теории массового обслуживания внес выдающийся русский советский математик Александр Яковлевич Хинчин (1884 – 1959).

Анализ применения теории массового обслуживания при моделировании боевых действий авиации и ПВО представлен в хрестоматийных работах Е. С. Вентцель, Л. А. Овчарова и В. Р. Дурова [79; 138; 269].

Теория массового обслуживания занимается изучением *систем массового обслуживания* (СМО), т. е. таких систем, в которых, с одной стороны, возникают массовые требования на выполнение каких-либо задач, а с другой – происходит удовлетворение этих требований (по мере возможности), см. рис. 6.2.5.

СМО могут быть классифицированы по разным основаниям:

1. Число каналов обслуживания: одноканальные и многоканальные.
2. Тип обслуживания заявок: СМО с отказами, СМО с ожиданием (очередь или время ожидания обслуживания могут быть ограничены).
3. Характер потока заявок: марковские и немарковские СМО.
4. Качество обслуживания заявок: СМО с ошибками в обслуживании и СМО без ошибок.
5. Способность или неспособность заявки нанести ущерб каналу обслуживания.
6. Количество этапов обслуживания: однофазные и многофазные СМО.
7. Дисциплина очереди: очередь упорядочена или нет, наличие или отсутствие приоритетов и др.

Дадим характеристику вышеперечисленным элементам СМО применительно к задаче моделирования боевых действий авиации и ПВО. Будем

считать, что авиация противника (или наша) формирует «поток заявок», а отдельной *заявкой* является нахождение летательного аппарата (ЛА) в зоне действия средств ПВО (рис. 6.2.6).

ЛА может иметь задачу поражения средства ПВО (простая стрелка на рисунке) или объекта прикрытия (двойная стрелка). В первом случае имеем так называемую *деградирующую СМО* (см. пример в [186]). Будем считать, что при поражении объекта прикрытия с любого направления ЛА попадает в зону действия всех средств ПВО. Если все ЛА одного типа, то имеем дело с однородными требованиями, иначе требования неоднородны.

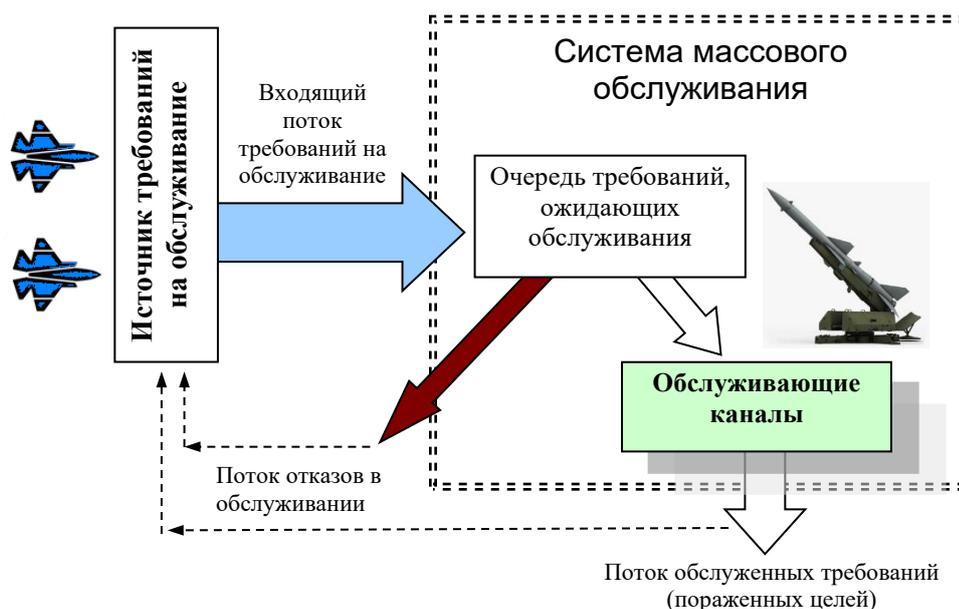


Рис. 6.2.5. Схема системы массового обслуживания

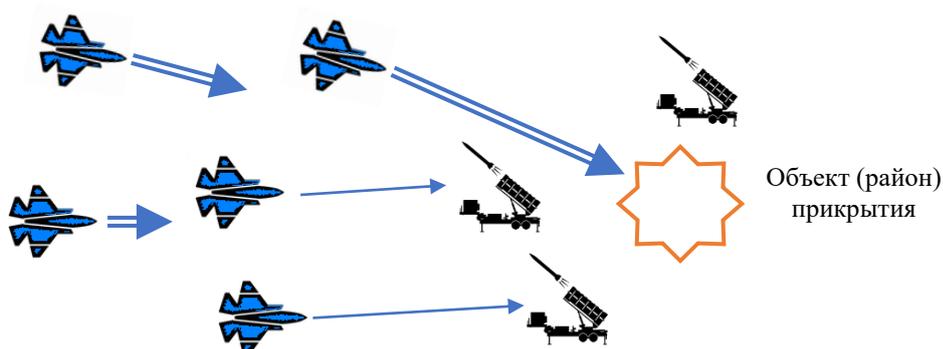


Рис. 6.2.6. Задачи авиации и ПВО

Определим, что понимают под каналом обслуживания. Будем считать *простым каналом обслуживания* отдельное средство (комплекс) ПВО, которое способно в автономном режиме и независимо от других средств обнаруживать заявки в зоне прикрытия объекта на любом направлении, сопровождать и поражать их (например, зенитная самоходная установка «Шилка», ЗРК

«Тор», ЗРПК «Панцирь»). Для простоты положим, что в зависимости от типа заявки канал обслуживания применяет один тип боеприпасов.

*Сложным каналом обслуживания* является, например, ЗРК С-300, включающий территориально разнесенные пусковые установки и командный пункт с РЛС обнаружения, сопровождения и наведения. При наличии сложных каналов имеем дело с многофазной СМО.

Сложный канал обслуживания иногда можно свести к простому. Например, ЗРПК «Панцирь-С1» способен одновременно обстреливать 2-4 цели [58]. В этом случае вместо реальной интенсивности обслуживания заявок (ЛА противника) можно использовать расчетную, которая в 2-4 раза выше реальной.

Наиболее просто моделируются системы массового обслуживания с простыми каналами (однофазные СМО).

Обычно полагается, что рассматриваемые здесь системы массового обслуживания являются системами с отказами – если ЛА не «обслужен» (не поражен по причине занятости каналов другими заявками), то он или покидает систему (наносит удар по объекту прикрытия) или поражает одни из каналов (средство ПВО). Иногда считается, что СМО являются системами с ограниченным временем ожидания (исчисляемым минутами или секундами, в зависимости от скорости ЛА), т. е. временем нахождения ЛА в зоне поражения средствами ПВО.

Ошибки в обслуживании могут возникать как по техническим причинам (поражение целей на 100% не гарантировано), так и в результате воздействия средств РЭБ противника.

Приоритеты в обслуживании возникают, когда заявки разнородны и среди них надо выделить самые опасные (приоритетные), второстепенные, ложные цели и т. д.

Итак, заявками в СМО являются летательные аппараты, каналами обслуживания – средства ПВО.

Рассмотрим элементы *классической теории массового обслуживания*, основанной на марковских цепях и процессах гибели и размножения (см. раздел 4.1) на примере *одноканальной однородной СМО с отказами и без ошибок*. Пусть СМО состоит из одного канала ( $n = 1$ , например, ЗРПК «Панцирь») и на нее поступает пуассоновский поток заявок (ЛА противника) с интенсивностью  $\lambda$ , в общем случае зависящий от времени,  $\lambda = \lambda(t)$ . Заявка, заставшая канал занятым, получает отказ и покидает систему (поражает объект прикрытия).

В общем случае продолжительность обслуживания заявок является случайной величиной и зависит от высоты, направления и скорости полета ЛА,

координат точки его первого обнаружения, особенностей сопровождения ЛА и наведения на них средств поражения, потребностей канала обслуживания в перезарядке, замене ствола и т. д. и т. п. Обычно, с целью получения простых аналитических выражений, полагается, что время обслуживания заявки подчиняется экспоненциальному закону с параметром  $\mu$  (интенсивностью обслуживания одной заявки одним каналом) и плотностью распределения<sup>1</sup>:

$$f(t) = \mu e^{-\mu t}, \quad t > 0. \quad (6.2.16)$$

Отсюда следует, что поток обслуживаний – простейший. Граф состояний СМО показан на рис. 6.2.7. Отметим, что система работает без ошибок, т. е. средство ПВО достоверно поражает обслуживаемую цель.

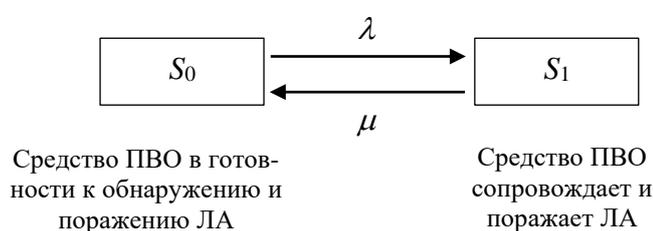


Рис. 6.2.7. Граф состояний одноканальной СМО с отказами и без ошибок

Из состояния  $S_0$  (канал свободен) в  $S_1$  (канал занят обслуживанием конкретной заявки и в этот интервал времени не может обслуживать другие заявки) систему переводит поток заявок с интенсивностью  $\lambda$ , а из  $S_1$  в  $S_0$  – поток обслуживаний с интенсивностью  $\mu$ . Для вероятностей состояний СМО выполняется условие:

$$p_0(t) + p_1(t) = 1. \quad (6.2.17)$$

Составим уравнения Колмогорова (см. также раздел 4.1.2):

$$\begin{aligned} \frac{dp_0(t)}{dt} &= -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t), \\ \frac{dp_1(t)}{dt} &= -\mu p_1(t) + \lambda p_0(t). \end{aligned} \quad (6.2.18)$$

Для начальных условий  $p_0(0) = 1$ ,  $p_1(0) = 0$  (канал свободен) находим решение (вероятность нахождения канала в готовности к обслуживанию заявок или *относительную пропускную способность* СМО) при  $\lambda = \text{const}$ :

$$p_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}. \quad (6.2.19)$$

<sup>1</sup> В общем случае закон обслуживания заявок может быть не экспоненциальным. Доказано, что результаты моделирования СМО с отказами остаются справедливыми для любых типов закона обслуживания заявок [79].

В установившемся режиме (при  $t \rightarrow \infty$ ) относительная пропускная способность и вероятность отказа в обслуживании (ожидаемая доля необслуженных заявок) равны

$$q = p_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \quad P_{отк} = p_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}. \quad (6.2.20)$$

СМО работает без сбоев, т. е. любой ЛА, попавший в зону действия средства ПВО, гарантированно уничтожается. Тем не менее, в силу случайного характера поступления заявок и их обслуживаний, часть ЛА (их доля равна  $p_1$ ) прорывается к объекту прикрытия.

Соответственно *абсолютная пропускная способность* системы равна:

$$A = \lambda q. \quad (6.2.21)$$

Содержательно абсолютная пропускная способность есть обслуживаемая (поражаемая) интенсивность потока заявок. Например, интенсивность заявок (летательных аппаратов) равна  $100 \text{ час}^{-1}$ ,  $q = 0,8$ . Тогда  $A = 80 \text{ час}^{-1}$ .

Для удобства расчетов вводится безразмерная величина, загрузка канала  $\rho = \lambda/\mu$  – отношение интенсивности заявок к интенсивности обслуживания. Тогда вероятности выполнения и невыполнения средствами ПВО задачи по прикрытию объекта равны

$$q = \frac{1}{\rho + 1}, \quad P_{отк} = \frac{\rho}{\rho + 1}.$$

Рассмотрим *пример* одноканальной СМО с отказами и ошибками. В течение 20 минут на прикрываемый средством ПВО объект ожидается налет 50 ЛА противника (интенсивность заявок равна  $\lambda = 150 \text{ час}^{-1}$ ). Средство ПВО способно с вероятностью  $p = 0,8$  поражать одну цель за среднее время 6 сек (интенсивность обслуживания равна  $\mu = 600 \text{ час}^{-1}$ ). Найти вероятность отражения удара противника и ожидаемое количество ЛА противника, которые прорвутся к объекту прикрытия.

Решение. Эффективная интенсивность обслуживания равна  $\mu^* = \mu p$ . Тогда вероятность отражения воздушного удара противника равна

$$p_0 = \frac{\mu^*}{\lambda + \mu^*} = \frac{480}{150 + 480} \approx 0,76.$$

К объекту прикрытия прорвутся  $50 \cdot (1 - 0,76) \approx 12$  ЛА противника. Если привлечь средство ПВО с вероятностью поражения  $p = 0,95$ , тогда получим  $p_0 = 0,79$ .

Крылатые ракеты и ЛА для преодоления ПВО/ПРО выполняют полет на малых высотах, что сокращает зону их обнаружения. Для повышения эффективности системы ПВО используются средства обнаружения, размещенные на

аэростатах, ЛА и т. д. Количественно оценить меры по увеличению зоны обнаружения можно с использованием СМО с ограниченным временем ожидания.

Рассмотрим *пример* одноканальной СМО с ограниченным временем ожидания. Средство ПВО (канал обслуживания), участвуя в прикрытии рубежа или объекта, действует независимо от других средств и для поражения цели имеет время  $\tau$  (протяженность маршрута ЛА в зоне действия ПВО, деленное на его среднюю скорость). Полагается, что при попадании ЛА (заявки) в зону ПВО он будет достоверно обнаружен. Пусть цель гарантированно поражается с первого выстрела (СМО без ошибок). Вероятность того, что канал обслуживания свободен, равна (стационарное решение) [114, с. 73-74]

$$\frac{1}{P_0} = \begin{cases} 1 + \frac{\rho}{(\lambda - \mu)} (\lambda e^{-\mu(1-\rho)\tau} - \mu) & \text{при } \lambda \neq \mu, \\ 2 + \lambda\tau & \text{при } \lambda = \mu, \end{cases} \quad (6.2.22)$$

а интенсивность потока отказов (среднее число непораженных ЛА противника в единицу времени) равна

$$\lambda_0 = P_0 \mu \rho^2 e^{-\mu(1-\rho)\tau}. \quad (6.2.23)$$

При  $\lambda = 150 \text{ час}^{-1}$ ,  $\mu = 600 \text{ час}^{-1}$  ( $\rho = 0,25$ ) и изменении времени  $\tau$  нахождения ЛА в зоне действия ПВО от 0 до 1,5 минут результаты расчетов показаны на рис. 6.2.8.

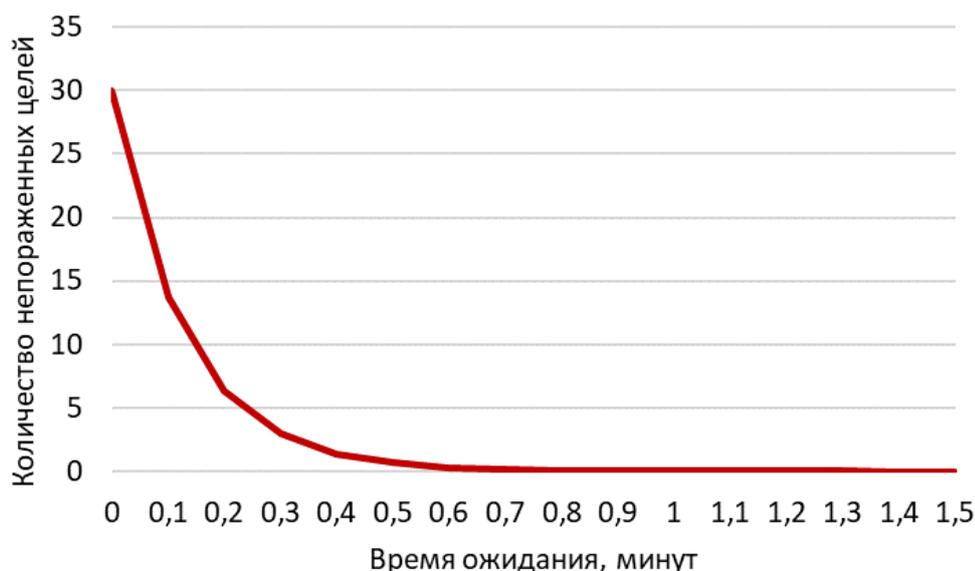


Рис. 6.2.8. Зависимость количества непораженных целей от времени нахождения ЛА в зоне действия ПВО

При  $\tau = 0$  результаты расчетов такие же, что и для одноканальной СМО с отказами. Из рисунка видно, что увеличение глубины зоны контроля средствами ПВО (и времени ожидания с 0 до 1 минуты) существенно увеличивает эффективность ПВО. Дальнейшее увеличение глубины зоны контроля для рассмотренного примера приводит к практически достоверному поражению всех целей.

Модели *многоканальных СМО* с отказами и ограниченным временем ожидания рассмотрены в [79; 114].

Важную роль в теории массового обслуживания имеет *формула (закон) Литтла*, справедливая для любых стационарных СМО:

$$L = \lambda V, \quad (6.2.24)$$

где:  $L$  – ожидаемое количество заявок в системе,  $V$  – среднее время пребывания заявки в СМО.

Закон Литтла устанавливает прямую зависимость между средним временем  $V$  (временем с момента входа летательных аппаратов в зону ПВО до момента их поражения или выхода из зоны ПВО) и количеством  $L$  (летательных аппаратов в зоне ПВО).

Рассмотренные выше модели получены в предположении, что поток заявок является простейшим (марковским). Ряд немарковских процессов можно свести к марковским за счет использования потоков Эрланга (содержательные задачи см. в [79; 138]).

*Методика исследования систем массового обслуживания* может быть следующей.

Шаг 1. Содержательный анализ задачи. Уточнение, что понимается под каналами обслуживания, заявками и к какому типу относится СМО.

Шаг 2. Нанесение на карту (схему) объектов прикрытия, мест дислокации объектов ПВО и вероятных направлений удара противника.

Шаг 3. Построение графа состояний системы.

Шаг 4. Формирование и решение уравнений Колмогорова.

Шаг 5. Подстановка в решение исходных данных и вычисление показателей эффективности функционирования СМО.

Шаг 6. Если найденные значения показателей не устраивают, то следует усилить группировку ПВО и повторить анализ, начиная с шага 1.

Шаг 7. Для получения более точных решений поставить задачу на разработку (применение) имитационных и теоретико-игровых моделей прикрытия объектов от удара с воздуха (поражения объектов противника).

Таким образом, методы теории массового обслуживания позволяют обосновать наряд сил и средств, необходимых для преодоления ПВО противника или отражения его воздушного удара.

Еще одним важнейшим применением методов теории вероятностей является теория надежности, используемая в задачах обеспечения боевой готовности систем военного назначения.

### ***6.2.3. Теория надежности и ее применение в задачах обеспечения боевой готовности***

*Теория надежности* (математическая) – это раздел теории вероятностей, изучающий вопросы, связанные с надёжностью технических изделий и систем на основе построения математических моделей рассматриваемых объектов [58].

Как самостоятельное научное направление теория надежности зародилась в США после Второй мировой войны. Для решения проблемы надежности в Институте радиоинженеров США была создана секция надежности и контроля качества, которая, начиная с 1954 г. стала созывать ежегодные симпозиумы по надежности. В СССР в 1954 г. вышел первый сборник переводов зарубежных материалов по вопросам надежности, из специалистов Военно-воздушной академии им. Н. Е. Жуковского была сформирована первая группа по теории надежности. В 1958 г. состоялась Первая Всесоюзная конференция по надежности. Выдающийся вклад в развитие теории надежности внесли Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев [113], адмирал И. А. Рябинин [314] и др. Современное состояние теории надежности и связанного с ней проектного анализа изложено в работе [83].

Кратко рассмотрим некоторые положения ***классической теории надежности*** [79]. Надежность технической системы зависит от количества образующих систему элементов (узлов), от способа их объединения в систему и от характеристик каждого отдельного элемента. Деление технических устройств на «системы» и образующие их «элементы» всегда условно и зависит от постановки задач и целей исследования. В одном случае бортовая радиолокационная станция (РЛС) истребителя может рассматриваться как сложная система, состоящая из передатчика, антенны, приемника, специализированного вычислителя, пультов управления и т. д. В другом случае самолет-истребитель является элементом системы ПВО.

*Надежностью*  $p(t)$  элемента называется вероятность того, что данный элемент в заданных условиях будет работать безотказно в течение времени  $t$ .

При рассмотрении вопросов надежности часто удобно полагать, что поток отказов является простейшим, тогда вероятность отказа подчиняется экспоненциальному закону:

$$p(t) = e^{-\lambda t}, \quad t > 0, \quad (6.2.25)$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов.

Пусть система состоит из  $n$  элементов и отказ любого из них приводит к отказу системы в целом (система без резервирования). Тогда в предположении, что элементы выходят из строя независимо друг от друга (независимы по отказам), надежность системы  $P$  равна:

$$P = \prod_{i=1}^n p_i, \quad (6.2.26)$$

где  $p_i$  – надежность  $i$ -го элемента.

Это нехорошее свойство (произведение вероятностей). Например, система состоит из 10-ти элементов, надежность каждого из них равна 0,99. Тогда надежность всей системы равна  $0,99^{10} \approx 0,9$ . При  $n = 100$  получим  $P \approx 0,37$ .

Для повышения надежности системы применяется резервирование («горячее» – несколько элементов работают параллельно, система работоспособна, если исправен хотя бы один из них; «холодное» – резервный элемент включается только в случае выхода из строя основного элемента).

Оценка надежности систем с восстановлением выполняется путем построения графа состояний и решения уравнений Колмогорова.

Следуя [352], перечислим основные направления *современной теории надежности*:

- анализ эффективности;
- анализ живучести;
- анализ безопасности;
- анализ защищенности;
- анализ надежности программного обеспечения.

*Анализ эффективности* касается тех сложных систем (истребитель, система ПВО и др.), для которых нельзя сформулировать критерий отказа в форме «все или ничего» (полностью исправен или полностью неисправен). Показатели эффективности характеризуют способность системы выполнять свои основные функции с пониженным уровнем производительности, качества, скорости и т. д., т. е. с меньшей эффективностью. В расчетах используются показатели «частичный коэффициент готовности», «частичный отказ» для описания многоканальных систем или систем со встроенной избыточностью. Анализ эффективности можно свести к стандартному анализу

надежности, выбрав соответствующий критерий (например, система считается неисправной, если ее результирующая «пропускная способность» упала ниже заданного уровня).

*Живучесть* есть свойство системы, отражающее ее способность выдерживать внешние воздействия. Такими воздействиями могут быть грубые ошибки оператора (расчета, экипажа), внешние природные воздействия (наводнения, пожары, землетрясения) или враждебные действия (воздействие ударными средствами, применение средств РЭБ, удары БПЛА и др. по аэродрому базирования истребителей). Анализ живучести обычно проводится в минимаксных терминах (см. игры с природой, принятие решений в условиях вероятностной неопределенности [285]). Часто живучесть рассматривается как характеристика больших территориальных систем (например, группировки авиации и ПВО на ТВД).

Под *живучестью военных систем* понимается свойство войск (сил), систем управления, оружия, военной техники, тыловых объектов сохранять или быстро восстанавливать боеспособность, т. е. способность выполнять боевые задачи в соответствии с предназначением в условиях всех видов воздействия противника и прочих факторов окружающей среды<sup>1</sup>. Методы и модели оценки живучести сложных систем разрабатываются с 1970-1980-х гг. (см. [185; 363; 364]).

Средства обеспечения живучести летательных аппаратов и систем ПВО подразделяются на пассивные и активные.

К *пассивным* средствам и мерам обеспечения живучести можно отнести:

- рассредоточение боевых порядков с целью минимизации вероятности поражения нескольких боевых единиц одним залпом;
- повышение прочности и защищенности наиболее важных узлов и механизмов (бронирование корпуса или кабины ЛА, резервирование основных систем и устройств);
- применение средств маскировки (радиопоглощающие материалы и покрытия, дымы и аэрозоли, ложные позиции и районы и др.);
- применение средств информирования об угрозах (системы пассивной радиолокации и тепlopеленгации и др.);
- выполнение инженерных мероприятий по защите складов вооружения, ГСМ и техники на позициях, аэродромах и т. д.

Перечислим *активные* средства и меры обеспечения живучести ЛА:

---

<sup>1</sup> Живучесть. – URL: <https://dictionary.mil.ru/folder/123100/item/128653/> (дата обращения: 20.08.2024).

- выход из зоны поражения;
- физическое поражение атакующего объекта;
- применение средств инфракрасного противодействия (отстреливаемые ложные тепловые цели и стационарные генераторы пульсирующих инфракрасных помех, инфракрасные лазеры и др.);
- применение средств РЭБ и т. д.

Активные и пассивные средства обеспечения живучести интегрированы в *бортовой комплекс обороны* летательного аппарата, предназначенный для своевременного обнаружения и классификации угрозы поражения ЛА, выработки решения по локализации угрозы и применения средств противодействия.

Г. Н. Черкесов техническую живучесть рассматривает в двух базовых значениях: а) как свойство системы сопротивляться негативным внешним воздействиям; б) как свойство системы восстанавливать свою работоспособность после отказа или аварии, вызванных внешними причинами [364]. Им предложены два основания классификации показателей (критериев) живучести технических систем:

1-е основание (функциональное) – показатели по: а) состоянию системы и б) результатам выполнения задания.

2-е основание (метод свертки частных показателей) – показатели аддитивные и минимаксные.

Для учета технических решений и мер по повышению живучести ЛА и систем ПВО можно использовать стандартные показатели, применяемые в теории надежности, например, коэффициенты готовности и оперативной готовности, придав им расширенное толкование.

Под *коэффициентом готовности*  $K_g(t)$  понимается вероятность заставить объект (систему) в работоспособном состоянии в момент времени  $t$  [83]. На практике используют его асимптотическое значение (стационарный коэффициент готовности):

$$K_g = \lim_{t \rightarrow \infty} K_g(t) = \frac{T}{T + t_b}, \quad (6.2.27)$$

где:  $T$  – среднее время наработки между отказами,  $t_b$  – среднее время восстановления.

Под *коэффициентом оперативной готовности*  $K_{og}(t, t_0)$  понимается вероятность того, что объект окажется работоспособным в момент времени  $t$  и далее проработает безотказно в течение интервала времени  $(t, t_0)$

$$K_{og}(t, t_0) = K_g(t)P(t, t_0), \quad (6.2.28)$$

где  $P(t, t_0)$  – вероятность безотказной работы в интервале времени  $(t, t_0)$ .

Определим *векторный коэффициент живучести боевой системы* (ЛА или средства ПВО)

$$G = (G_1, \dots, G_n), \quad G_i = \frac{K_{Bi}}{K_{Ni}}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (6.2.29)$$

где:  $G_i$  – коэффициент живучести боевой системы в условиях воздействия (разового или многократного)  $i$ -й угрозы (неблагоприятного воздействия),  $K_{Bi}$  ( $K_{Ni}$ ) – степень оперативной готовности системы при наличии (отсутствии) системы обеспечения живучести или бортового комплекса обороны в условиях воздействия  $i$ -й угрозы.

Степени  $K_{Bi}$  и  $K_{Ni}$  определяются как вероятности нахождения системы в работоспособном (ограниченно работоспособном) состоянии к моменту получения боевой задачи и ее выполнения (полного или ограниченного) в условиях воздействия  $i$ -й угрозы. Указанные вероятности могут рассчитываться аналитически или статистически (по результатам полигонных испытаний или данным военной статистики).

Свертка частных коэффициентов  $G_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , в единый критерий  $W$  может быть аддитивной:

$$W = \sum_{i=1}^n \alpha_i G_i \rightarrow \max, \quad \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1, \quad \alpha_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad (6.2.30)$$

где  $\alpha_i$  – весовой коэффициент, отражающий значимость и массовость  $i$ -й угрозы, или минимаксной

$$W = \min_{i=1, \dots, n} G_i \rightarrow \max. \quad (6.2.31)$$

Выражение (6.2.30) применяется в условиях, когда есть сведения (хотя бы на уровне экспертов) о значимости и массовости угроз (неблагоприятных воздействий). Иначе следует использовать выражение (6.2.31).

*Безопасность* есть свойство системы, характеризующее ее функционирование (хранение горюче-смазочных веществ и боеприпасов, движение колонн и т. п.) без опасных последствий для человека и окружающей среды. Обычно безопасность характеризуется показателями вероятностной природы, близкими тем, которые используются при анализе надежности.

В последнее время задачи живучести и безопасности рассматриваются в рамках вероятностной теории риска [83]. На содержательном уровне вопросы безопасности и живучести самолетов рассмотрены в [24].

*Защищенность* системы рассматривается часто в рамках проблем, связанных с анализом надежности и безопасности. Действительно, многие

системы должны работать не только надежно, но должны быть также защищены от несанкционированного доступа. Применительно к радиоэлектронным средствам, радиолокационным станциям и системам связи рассматривается их *помехозащищенность* (она определяется защищенностью от непосредственной разведки комплексов радиоэлектронного подавления противника, помехоустойчивостью приёмной аппаратуры, пространственно-селектирующими возможностями диаграмм направленности приёмных антенн [58]). Обычно при анализе защищенности военных систем и систем обеспечения безопасности говорят о двух ее аспектах – технической и информационной.

При оценке *надежности программного обеспечения* многократные попытки применения традиционных концепций теории надежности оказались практически безуспешными. Для компьютерных программ нет понятия выборки, все они успешно клонируются и тиражируются. Если программа не работает, то обычно нет смысла в повторной ее установке.

Наряду с надежностью программного обеспечения малоисследованными проблемами являются следующие:

- «человеческий фактор» в надежности (содержательное описание функциональной надежности военных летчиков см. в [222]);
- анализ надежности уникальных изделий;
- анализ глобальных (национальных) территориальных и военных систем;
- анализ надежности развивающихся систем;
- нахождение оптимального состава запасных элементов и их эшелонирование для иерархических военных и других систем;
- агрегирование данных о надежности.

#### ***6.2.4. Агрегированная функция ПВО***

Методы теории вероятностей (включая теорию систем массового обслуживания и теорию надежности) хорошо себя зарекомендовали при детальном описании военных систем, т. е. на этапе ведения боевых действий. Вместе с тем, они, наряду с методами имитационного моделирования, могут послужить основой для обоснования агрегированных функций (см. главу 3), используемых на этапе подготовки к боевым действиям и при военно-экономическом анализе.

Рассмотрим задачу обороны объекта средствами ПВО/ПРО от ударов с воздуха (рис. 6.2.9).

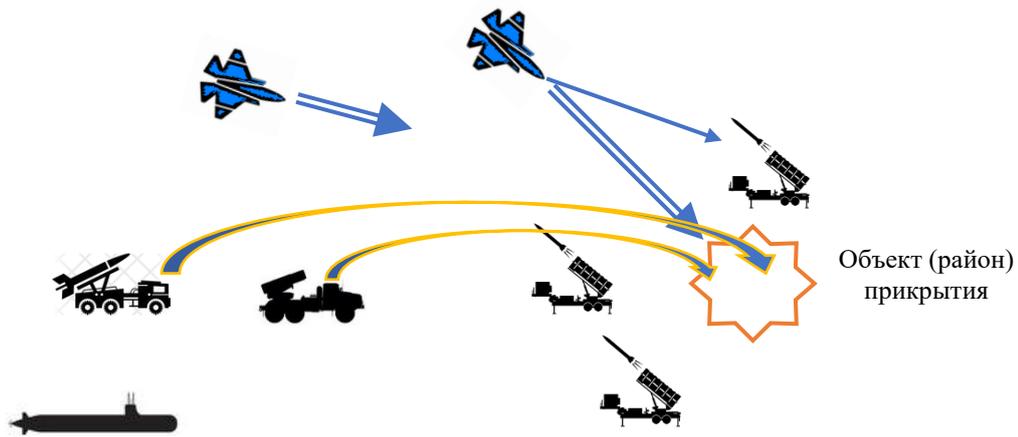


Рис. 6.2.9. Схема защиты объекта средствами ПВО от ударов с воздуха

Противник может наносить удары с платформ воздушного, наземного, надводного и подводного базирования. Удары по объекту могут быть массированными, групповыми и одиночными. В качестве средств поражения могут выступать крылатые и баллистические ракеты (межконтинентальные, средней и малой дальности), неуправляемые и управляемые ракеты класса «воздух-поверхность», авиабомбы, артиллерийские ракеты и снаряды, ударные и разведывательно-ударные БПЛА и др.

Прикрываемый объект может быть различной площади и разнородности (крупный город, промышленные объекты, районы дислокации соединений и частей, отдельные пусковые установки и т. д.), находиться в зоне боевых действий, в прифронтной полосе или в глубоком тылу, иметь различные степени живучести и защищенности и т. д.

Каждый из объектов прикрытия обычно характеризуется *полигонным нарядом* средств воздушного нападения (СВН) – минимальным количеством СВН, необходимых для нанесения объекту заданной степени поражения с заданной вероятностью [30; 116; 377]. Обоснованный расчет полигонного наряда затруднен из-за многих неопределенностей (заранее неизвестны типы СВН, неясно, какие задавать степени поражения и вероятности и т. д.). Поэтому представляется возможным вместо полигонного наряда использовать *ценности объектов* (потенциальные ущербы от их поражения). Эти ценности в большей степени зависят от характера объектов, степени их защищенности и живучести.

Расчеты в интересах повышения эффективности и оптимизации ПВО выполняются в ходе боевых действий и при подготовке к ним (заблаговременной, в мирное время, или непосредственной). На оперативном и тактическом уровне в качестве одного из показателей боевых возможностей

ПВО используется математическое ожидание числа перехваченных целей, оцениваемое с использованием двух подходов [348]:

- при полном израсходовании суммарного боекомплекта;
- при отражении удара противника заданной длительности (с заданными параметрами).

Первый подход применяется при заблаговременном планировании и при отсутствии сведений о противнике, второй – при обосновании замысла на применение средств ПВО.

Известно, что применяемые моделирующие комплексы (например, «Спектр-НВ» [323]) требуют значительного времени на ввод исходных данных, расчеты и их интерпретацию. Поскольку обстановка меняется динамично, существует потребность в разработке и обосновании простейших моделей, позволяющих, хотя бы грубо, в первом приближении рассчитать наряд потребных сил и средств для защиты типовых объектов от типовых (перспективных) угроз. Примеры подобных расчетов представлены в таблицах 1.1.1, 1.1.2 и 3.2.1 (см. разделы 1.1 и 3.2).

В качестве агрегированной функции ПВО можно использовать функцию конфликта на основе разности сил (см. разделы 3.1.2 и 3.2, модель Г. Таллока), а ее параметры оценивать методами теории массового обслуживания и с использованием моделирующих комплексов. Тогда агрегированная функция ПВО (вероятность успешного прикрытия объекта средствами ПВО/ВКО) равна:

$$p_x(x, y) = \frac{\beta x^\alpha}{\beta x^\alpha + y^\alpha} = \frac{\beta q^\alpha}{\beta q^\alpha + 1}, \quad q = \frac{x}{y}. \quad (6.2.32)$$

Учитывая существующие методики определения рационального состава системы ПВО [348], представляется обоснованным в качестве переменной  $x$  использовать стоимость средств (систем) ПВО, поскольку интенсивность обслуживания (и продолжительность) заявок определяется главным образом скорострельностью, боекомплектом и другими технико-экономическими характеристиками. Тогда переменная  $y$  – это стоимость систем поражения (платформ), включая стоимость используемых средств поражения (ракет, авиабомб и т. д.).

Заметим, что при  $\alpha = \beta = 1$  получаем модель одноканальной системы массового обслуживания с отказами: вероятность  $p_x$  есть относительная пропускная способность, а  $x$  и  $y$  – интенсивности обслуживания и заявок соответственно. Учет ошибок в обслуживании (и ошибок в наведении на объект) возможен за счет параметра  $\beta$ , т. е. за счет перехода к использованию эффективных интенсивностей (см. одноканальные СМО с отказами и ошибка-

ми). Если объект имеет большую площадь, то средствам ПВО назначаются сектора ответственности, что в модели можно учесть значением параметра  $\beta$ . Например, если для круговой обороны объекта большой площади требуется привлечение трех средств ПВО, то значение параметра  $\beta = 1/3$ . Соответственно, если средство ПВО прикрывает два объекта, то  $\beta = 2$ .

Одноканальные с ограниченным временем ожидания и многоканальные СМО достаточно хорошо аппроксимируются моделью (6.2.32) за счет подбора параметров  $\beta$  и  $\alpha$ .

Методика оценки параметров модели (6.2.32) может быть следующей.

*Шаг 1.* Формирование перечня объектов, оценка их защищенности и ценности (ожидаемого ущерба в случае поражения). Классификация объектов по типам.

*Шаг 2.* Оценка типовых СВН противника (количество по типам, скорость, зависимость «дальность-нагрузка», плотность налета и т. д.).

*Шаг 3.* Для каждого типа объекта оценка значения параметра  $\beta = 1/\omega$ , где  $\omega$  – количество типовых средств ПВО, необходимых для прикрытия объекта с любого из возможных направлений воздушного удара.

*Шаг 4.* Для каждого типа объекта и для 3-6-ти значений отношения стоимостей (и возможностей)  $q$  (например, 0,1; 0,5; 1; 1,5; 2 и 5) с помощью моделирующего комплекса расчет вероятности  $p_x$  отражения удара с воздуха и оценка параметра  $\alpha$ .

Таким образом, применение теоретико-вероятностных моделей боевых действий позволяет оценивать боевые возможности, готовность и эффективность применения военных систем.

### **6.3. Оптимальное управление и дифференциальные игры в задачах моделирования боевых действий в воздухе**

Оптимальное управление и дифференциальные игры являются значимыми разделами технической и военной кибернетики. Маневрирование и наведение на цели летательных аппаратов, ракет, управляемых снарядов и бомб, ведение воздушных боев «один-на-один» в автоматическом и автоматизированном режимах немислимо без применения методов оптимального управления и дифференциальных игр.

Специфика данного раздела заключается в том, что, во-первых, с содержательной точки зрения рассматриваемые здесь методы и их приложения позволяют перейти от физических принципов и технических характеристик летательных аппаратов (а также ракет, снарядов и бомб) к их боевым возможностям и далее – к решению тактических задач (см. следующий раздел). Во-вторых, с точки зрения математики в этом разделе рассматриваются достаточно сложные и непростые для понимания и применения методы оптимизации, что и определило особенности изложения материала настоящего раздела.

### ***6.3.1. Оптимальное управление динамическими системами***

Сразу после Второй мировой войны, с началом Холодной войны две сверхдержавы, США и СССР, активизировали свои усилия по использованию математиков и их математических теорий в оборонных задачах. Поэтому неудивительно, что математики Востока и Запада почти одновременно начали разрабатывать методы решения задач, которые позже стали известны как задачи оптимального управления, такие как, например, задачи перехвата с минимальным временем для истребителей. Первоначально эти проблемы пытались решить инженеры. Еще в 1946 году Д. Е. Охоцимский (будущий академик АН СССР) решил конкретную задачу о вертикально поднимающейся ракете для достижения заданной конечной высоты при минимальной начальной массе [277]. Предложенное им решение состоит из движения с максимально допустимой тягой, подъема с оптимальным соотношением между скоростью и высотой и, наконец, фазы с выключенной тягой.

После окончания Второй мировой войны военно-воздушные силы армии США в Санта-Монике, штат Калифорния, создали корпорацию RAND (исследования и разработки) как некоммерческий аналитический центр, специализирующийся на вопросах глобальной политики и предлагающий исследования и анализ вооруженным силам Соединенных Штатов. На рубеже десятилетий, в 1950-е и последующие годы, в RAND одновременно работали три математика, внесших колоссальный вклад в возникновение и становление рассматриваемой области: Магнус Р. Хестенес (1906-1991), Руфус П. Айзекс (1914-1981) [482] и Ричард Э. Беллман (1920-1984) [418; 419].

В 1949-1950 гг. М. Р. Хестенес написал две свои знаменитые исследовательские записки RAND № 100 и 102 [475; 476]. В этих отчетах, в условиях появления цифровых компьютеров, М. Р. Хестенес разработал руководство по численному расчету траекторий движения самолетов за минимальное время.

В частности, меморандум М. Р. Хестена RM-100 содержит раннюю формулировку того, что позже стало известно как принцип максимума: оптимальный вектор управления (угол атаки и угол крена) должен быть выбран таким образом, чтобы он максимально увеличивал гамильтониан вдоль минимизирующей кривой. В его докладе мы уже находим четкий формализм задач оптимального управления с его разделением на переменные состояния и управляющие переменные.

В Большой российской энциклопедии под *динамической системой* понимается математическая модель эволюции реальной (физической, биологической, экономической и др.) системы, состояние которой в любой момент времени однозначно определяется ее начальным состоянием. Соответственно, *оптимальное управление* определяется как раздел математики, в котором изучаются неклассические задачи вариационного исчисления с использованием *принципа максимума Понтрягина* и *динамического программирования* (разработаны в 1950-е гг.).

Поскольку истребители и другие летательные аппараты, ракеты, управляемые снаряды являются сложными динамическими системами, то начиная с 1970 г. в хрестоматийные книги по исследованию операций [8; 79; 371] включается описание методов оптимального управления и динамического программирования и их приложений в военном деле.

Формулировка задачи теории оптимального управления требует описать или задать:

1. Оптимизируемый критерий качества: быстродействие, расход ресурсов, производительность, минимальные потери от управления и др.
2. Временное описание процессов, протекающих в исследуемой системе: непрерывные, дискретно-непрерывные, дискретные.
3. Тип дифференциальных уравнений, описывающих систему: линейные, нелинейные, уравнения в частных производных, стохастические дифференциальные уравнения и др.

Для решения задачи оптимального управления могут быть применены методы классического вариационного исчисления, принцип максимума Понтрягина, динамическое программирование Беллмана. Кроме того, поскольку оптимальное управление зачастую требует информации о текущем положении системы, используются методы *оптимального оценивания*, такие как алгоритмы Винера-Колмогорова и Калмана-Бьюси и др. Отметим, что постановки теории оптимального управления можно рассматривать как развитие идей вариационного исчисления, в которых по сути, рассматриваются задачи оптимального управления без ограничений на множество допустимых управлений.

Задачи оптимального управления в условиях конфликта или неопределенности решаются методами теории *дифференциальных игр*.

Кратко отметим основные вехи развития теории оптимального управления.

Появление реактивной авиации и ракет поставили перед учеными ряд проблем по их эффективному применению, которые не решались классическими методами вариационного исчисления (ограниченность множества допустимых управлений, вырожденность решений при описании процессов и управлений линейными дифференциальными уравнениями и др.) [104].

В 1954 г. Л. С. Понтрягин организовал семинар по прикладным проблемам математики в Математическом институте АН СССР, вовсе не имея в виду специального изучения проблем управления и тем более такой конкретной области, как проблемы оптимального управления. Понтрягинский семинар вскоре после начала своей работы стал центром притяжения для многих ведущих специалистов в прикладных областях математики.

В 1955 году группа Л. С. Понтрягина встретила с военнослужащими Военно-воздушных сил СССР и профессорами Военно-воздушной инженерной академии им. Н. Е. Жуковского. Также, как и в США, задача быстрогодействия в ВВС СССР была основной задачей, требующей решения. Обсуждалась проблема оптимального быстрогодействия самолета, которая описывалась дифференциальным уравнением пятого порядка с тремя управляющими скалярными параметрами, два из которых были ограничены и входили в уравнение линейно; следовательно, было ясно с самого начала, что экстремали задачи не могут быть найдены классическим методом – как решения уравнений Эйлера–Лагранжа. После нескольких кратких и безуспешных попыток найти решение сформулированной конкретной задачи Л. С. Понтрягин пришел к заключению, что проблеме следует поставить в общем виде и начать с того, чтобы найти какие-то общие принципы для ее решения, которые можно было бы затем применить к конкретным случаям.

На семинаре Л. С. Понтрягина сначала была изучена книга А. А. Андропова по теории колебаний (см. [21; 22]). Для улучшения качества решения прикладных задач были приглашены инженеры. В частности, А. А. Фельдбаум<sup>1</sup> и А. Я. Лернер акцентировали внимание на важности

---

<sup>1</sup> Александр Аронович Фельдбаум (1913-1969), отечественный специалист в теории автоматического регулирования и элементной базы ЭВМ, автор принципа дуального управления в теории самонастраивающихся и самообучающихся систем. А. А. Фельдбаум не был математиком, его научные интересы относились к авиации, и к тому времени ему удалось решить некоторые задачи управления с приложениями к этой области. Его

оптимальных процессов линейных систем автоматического управления. Первые результаты были опубликованы Л. С. Понтрягиным и его коллегами В. Г. Болтянским и Р. В. Гамкрелидзе в 1956 году [57].

Описание принципа максимума Понтрягина – основы теории оптимального управления, можно найти в работе Л. С. Понтрягина и его учеников [303], а также в учебниках и учебных пособиях по теории оптимального управления (см, например, [69]). Здесь же заметим, что применение принципа максимума Понтрягина позволяет свести задачу поиска управления в бесконечномерном функциональном пространстве к более «легкой» конечномерной задаче максимизации [230].

### 6.3.2. Динамическое программирование

Значимым разделом в теории оптимального управления является *динамическое программирование* как метод решения многошаговых задач, разработанный Ричардом Беллманом [43]. Под «программированием» в динамическом программировании понимают принятие решений (планирование), а слово «динамическое» указывает на существенную роль времени и порядка выполнения операций.

Пусть процесс управления некоторой системой (отражение воздушного налета противника, поиск оптимального пути на графе, задача распределения ресурса и т. д.) состоит из  $n$  шагов. На  $i$ -м шаге управление  $u_i$  переводит систему из состояния  $x_{i-1}$  (где она находилась после  $i-1$  шага) в новое состояние  $x_i$ .

В динамическом программировании предполагается: а) отсутствует последствие и б) целевая функция является аддитивной по периодам времени, т. е.

$$F = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x_{i-1}, u_i).$$

*Принцип оптимальности Беллмана:* пусть выбраны управления  $u_1, u_2, \dots, u_k$  (и тем самым траектория состояний  $x_0, x_1, \dots, x_k$ ) и требуется завершить процесс, т. е. выбрать  $u_{k+1}, \dots, u_n$  (а значит и  $x_{k+1}, \dots, x_n$ ). Если завершающая часть процесса не будет оптимальной в смысле достижения максимума функции

---

интересовало создание математической теории, описывающей преследование одного самолёта другим.

$$F_k = \sum_{i=k+1}^n \varphi_i(x_{i-1}, u_i),$$

то и весь процесс не будет оптимальным. Применительно к задаче о выборе оптимальной траектории полета самолета его состоянием на  $i$ -м шаге ( $i = 1, \dots, n$ ) может быть вектор  $x_i = (v_i, h_i)$  скорости  $v_i$  и высоты  $h_i$ , управление  $u_i$  – вектор тяги, функция  $\varphi_i(\cdot)$  – расход топлива на  $i$ -м шаге,  $F$  – суммарный расход топлива,  $F_k$  – расход топлива на части траектории (с  $k$ -го шага до  $n$ -го).

Пользуясь принципом оптимальности Беллмана, можно получить основное функциональное соотношение динамического программирования, которое состоит в следующем. Пусть

$$\omega_n(x) = 0, \quad \omega_{k-1}(x) = \min[\omega_k(f_k(x, u)) + \varphi_k(x, u)], \quad k = 1, \dots, n, \quad (*)$$

где минимум берется по всем управлениям  $u$ , допустимым на шаге  $k$ . Здесь  $\omega_k(x)$  – минимальный расход топлива при движении по траектории с  $k$ -го шага до  $n$ -го,  $f_k(\cdot)$  – функция для вычисления части траектории (начиная с  $k$ -го шага), на которой расход топлива минимален.

Соотношение, определяющее зависимость  $\omega_{k-1}$  от  $\omega_k$ , называется *уравнением Беллмана*. Смысл этих функций достаточно ясен: если система на шаге  $k-1$  оказалась в состоянии  $x$ , то  $\omega_{k-1}(x)$  есть максимально возможное значение функции  $F_k$ . Одновременно с построением функций  $\omega_{k-1}(x)$  находятся условные оптимальные управления  $u_k(x)$  на каждом шаге, т.е. значения оптимального управления при всевозможных предположениях о состоянии  $x$  системы на шаге  $k-1$ . На оставшейся части траектории движение должно происходить оптимальным образом.

Отметим, что к числу классических задач динамического программирования относят следующие:

1. *задачу о рюкзаке* (экипировке военнослужащего, бортовом комплексе обороны): из множества предметов со свойствами «стоимость» («эффективность») и «вес» требуется отобрать некое число предметов таким образом, чтобы получить максимальную суммарную стоимость при ограниченном суммарном весе (см. также раздел 6.4.1) [201; 230; 310].

2. *задачу о нахождении кратчайшего пути* между заданными пунктами (вершинами графа) при известной стоимости перемещения [201; 230; 347].

Прежде чем переходить к рассмотрению теории дифференциальных игр и ее приложений к задачам воздушного боя, рассмотрим краткие сведения о динамике самолетов.

### 6.3.3. Краткие сведения о динамике самолетов и дифференциальная игра преследования двух игроков

Динамика полета – это раздел механики, в котором изучается движение ЛА в атмосфере [41; 362]. При исследовании динамических свойств обычно применяют упрощенную модель самолета как абсолютно твердого тела переменной массы. При расчете летно-технических характеристик самолет рассматривается как материальная точка.

В динамике полета ЛА применяются правые декартовы системы координат. На рис. 6.3.1 показана *связанная система координат*. Она жестко фиксирована по отношению к ЛА и ее положение относительно *нормальной системы координат*<sup>1</sup> определяет пространственное положение ЛА.

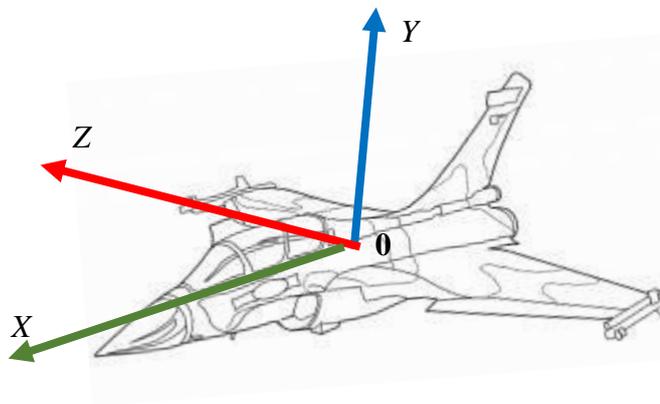


Рис. 6.3.1. Связанная система координат

*Углом рыскания*  $\psi$  называют угол между осью  $OX_g$  и проекцией продольной оси  $OX$  на горизонтальную плоскость  $OX_gZ_g$  (угол поворота корпуса ЛА в горизонтальной плоскости). Рысканием управляет руль направления.

*Угол тангажа*  $\theta$  – это угол между осью  $OX$  и горизонтальной плоскостью  $OX_gZ_g$  (угол между продольной осью ЛА и горизонтальной плоскостью). Маневр ЛА с увеличением угла тангажа называется кабрированием, с уменьшением – пикированием).

*Угол крена*  $\gamma$  – это угол между осью  $OY$  и вертикальной плоскостью, содержащей продольную ось  $OX$ . Маневры крена используются при разворотах, выполнении фигур пилотажа.

<sup>1</sup> Нормальная система координат  $OX_gY_gZ_g$  – это подвижная система координат, начало которой помещено в центр масс ЛА, ось  $OY_g$  направлена вверх по местной вертикали, ось  $OX_g$  обычно направлена на север по касательной к географическому меридиану, а ось  $OZ_g$  направлена на восток по касательной к географической параллели.

В нормальной системе координат простейшие кинематические уравнения движения ЛА имеют вид [41]:

$$\begin{aligned}\frac{dX_g}{dt} &= V \cos \theta \cos \psi, \\ \frac{dY_g}{dt} &= \frac{dH}{dt} = V \sin \theta, \\ \frac{dZ_g}{dt} &= -V \cos \theta \sin \psi,\end{aligned}$$

где:  $H$  – высота полета над поверхностью Земли,  $V$  – модуль скорости полета.

В конце 1950-х - начале 1960-х годов прикладные задачи военного характера, а именно сформировавшийся класс *задач преследования-уклонения*, определили возникновение нового раздела теории управления: теории дифференциальных игр. Основой для исследования задачи преследования одним или несколькими игроками одного убегающего стали фундаментальные работы советских научных школ Л.С. Понтрягина [301; 302], Н.Н. Красовского [189], киевских [308] и ленинградских [286; 290] математиков, а также зарубежных математиков Р. Айзекса, Л. Берковица, У. Флеминга и др. [13; 420].

В *дифференциальных играх* (термин был введен Р. Айзексом) эволюция состояния игроков описывается дифференциальными уравнениями, содержащими управляющие векторы, которыми распоряжаются игроки (имеются как минимум два субъекта управления (выбирающих каждый свои управляющие воздействия), цели которых диаметрально противоположны. Для выбора своего управления каждый игрок может использовать лишь текущую информацию о поведении игроков.

Дифференциальные игры классифицируются по:

- числу игроков (игры двух игроков, многих игроков, бесконечного числа игроков);
- динамике игроков (детерминированная, стохастическая, с переменной структурой, в том числе дифференциальные игры с ложной целью);
- информированности игроков (игры с полной и неполной информацией);
- классам управлений и применяемым стратегиям (линейные, линейно-выпуклые, линейно-квадратичные, позиционные и др.);
- цене игры (терминальные и не терминальные критерии);
- наличию геометрических и фазовых ограничений<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Фазовые координаты игроков помимо декартовых координат могут включать их скорости, ускорения и другие характеристики.

Наиболее исследованными являются *дифференциальные игры преследования*, в которых количество игроков равно двум, одного из них называют *преследователем*  $P$  (например, ракета ПВО, истребитель), другого *убегающим*  $E$  (например, самолет). Цель преследователя: приведение вектора  $z(t)$  – состояния системы (т. е. точки на траектории), – на заданное множество  $M$  за минимальное время; цель убегающего – по возможности отложить момент прихода вектора  $z(t)$  на  $M$ . В качестве множества (линии) может использоваться рубеж, после которого преследование невозможно или нецелесообразно.

Запишем уравнения движения преследователя и убегающего на плоскости (горизонтальной или вертикальной) в форме, принятой в теории дифференциальных игр [289]. Пусть  $v$  – модуль вектора скорости игрока  $E$ ,  $\beta$  – его курс, а  $u$  – скорость игрока  $P$ ,  $\alpha$  – соответственно его курс. Уравнения движения игроков имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_P = u_P \cos \alpha, & \dot{x}_E = v_E \cos \beta, \\ \dot{y}_P = u_P \sin \alpha, & \dot{y}_E = v_E \sin \beta. \end{cases} \quad (6.3.1)$$

Уравнения относительного движения записываются в системе координат с центром в точке  $P$ :

$$\begin{cases} \dot{x} = u_P \cos \alpha - v_E \cos \beta, \\ \dot{y} = u_P \sin \alpha - v_E \sin \beta. \end{cases} \quad (6.3.2)$$

Переменные  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $u_P$ ,  $v_E$  играют роль функций *управления* (выбираемого соответствующими игроками), на которые наложены ограничения

$$\begin{aligned} 0 \leq u_P \leq b, \quad |\dot{\alpha}| \leq \alpha_{\max}, \\ 0 \leq v_E \leq a, \quad |\dot{\beta}| \leq \beta_{\max} \end{aligned} \quad (6.3.3)$$

(скорости и темпы изменения углов ограничены).

Ограничения вида (6.3.3) задают  $Q$  – *область допустимых управлений*. Эволюцию вектора относительного положения игроков удобно записывать через изменение его модуля  $D = \sqrt{x^2 + y^2}$  (расстояния между игроками) и ориентации  $\varepsilon$  (угол между отрезком  $PE$  с осью  $x$ ) в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{D} = -u_P \cos(\varepsilon - \alpha) + v_E \cos(\varepsilon - \beta), \\ D\dot{\varepsilon} = u_P \sin(\varepsilon - \alpha) - v_E \sin(\varepsilon - \beta). \end{cases} \quad (6.3.4)$$

Обозначим через  $u = (u_P, \alpha)$ ,  $v = (v_E, \beta)$  вектора управлений игроков  $P$  и  $E$ . Критерием игры может являться  $T$  – первый момент времени при преследовании, в котором выполняется равенство

$$D(T) = l, \quad (6.3.5)$$

где  $l$  – наперед заданное положительное число. Этот момент времени  $T$  называется *терминальным*. В общем случае значение критерия игры  $G$  назы-

вается его *ценой*, задается функционалом, зависящем от траекторий движения игроков. В текущей постановке в предположении, что преследование началось в нулевой момент времени критерий (цена игры или платежный функционал) принимает вид

$$G(v(\cdot), u(\cdot)) = T. \quad (6.3.6)$$

В пространстве  $R^2 \times R^2$  позиций игроков обозначим совместный вектор их позиций  $z(t)$ . Соответственно уравнения движения (6.3.1) примут вид

$$\dot{z}(t) = w(z(t), u(t), v(t)). \quad (6.3.1^*)$$

Тогда равенство (6.3.5) задает терминальную поверхность, на которой заканчивается дифференциальная игра. Ясно, что убегающий, выбирая свое управление в виде вектора скорости и его модуля, старается не позволить преследователю выполнить поставленную задачу и отдалить терминальный момент времени  $T$  вплоть до бесконечности. Поэтому задача убегающего игрока заключается в том, чтобы обеспечить

$$\max_v \min_u G,$$

а задача преследователя записывается в виде

$$\min_u \max_v G.$$

В случае, когда значения выражений (6.3.7) и (6.3.8) совпадают, говорят, что у дифференциальной игры (6.3.1), (6.3.3), (6.3.5) – (6.3.8) существует решение на траекториях движения игроков, на которых достигается это равенство.

Обозначим

$$J_{uv} = \max_v G_v(v) = \max_v \min_u G(u, v). \quad (6.3.7)$$

$$I_{uv} = \min_u G_u(u) = \min_u \max_v G(u, v), \quad (6.3.8)$$

Равенство

$$I_{uv} = J_{uv} \quad (6.3.9)$$

по определению возможно, если у исследуемого функционала существует *седловая точка*  $(u, v)$ . Известно, что для дискретных парных игр справедлива теорема Неймана о существовании решения (стратегии) игры. Поэтому стратегию  $(u, v)$ , доставляющую равенство (6.3.9), будем называть *чистой стратегией*. Управление  $(u^0, v^0)$ , доставляющее минимакс выражению (6.3.8) назовем *оптимальной стратегией*, а значение критерия (6.3.8) *минимаксом*.

В процессе преследования-уклонения могут появляться дополнительные ограничения, накладываемые на траектории движения игроков, также могут изменяться количество игроков и их возможности к маневрированию; более того по достижению некоторой области преследователь и убегающий могут

меняться местами, что в совокупности с исходной формулировкой значительно затрудняет решение дифференциальной игры.

#### 6.3.4. Постановки задач дифференциальной игры

Таким образом, сделаны все приготовления, чтобы сформулировать простейшую игру в рамках теории непрерывных дифференциальных парных игр.

**Задача 1.** Найти минимакс функционала (6.3.8) на множестве допустимых функций (6.3.1), множестве допустимых управлений (6.3.3) и при ограничениях вида (6.3.5). Содержательно задача может формулироваться так: найти оптимальную траекторию истребителя, преследующего бомбардировщик противника, для которой время выхода на позицию пуска ракеты минимально.

Другие постановки дифференциальной игры возникают, если рассматривать игру либо со стороны догоняющего, либо со стороны убегающего. При этом в первом случае по Л. С. Понтрягину [301] предполагается, что догоняющий в момент времени  $t$  знает:

- динамические возможности всех игроков (т. е. их уравнения движения и множество допустимых управлений);
- начальное состояние игры  $z(0)$ ;
- управление убегающего  $v(s)$  при  $s \in [0, t]$ .

Отображение<sup>1</sup>  $u(t) = U(z(0), v(\cdot))$ , задаваемое на множестве произвольных интегрируемых функций  $v(t) \in Q$ ,  $t \geq 0$ , будет определять стратегию догоняющего.

Дополнительно потребуем, чтобы для произвольной  $v(t) \in Q$ ,  $t \geq 0$ , функция  $u(t) = U(z(0), v(\cdot))$  была интегрируема по  $t$  и  $u(t) \in Q$ .

В этом случае формулируем задачу преследования в виде.

**Задача 2.** Найти множество начальных позиций  $z(0)$ , для которых догоняющий обладает такой стратегией  $U$ , что она обеспечивает успешное окончание преследования для произвольной интегрируемой функции  $v \in Q$  не позже некоторого конечного момента времени  $T$ .

Такие позиции  $z(0)$  будем называть решениями задачи 2, а время  $T = T(z(0))$  – временем преследования, за которое преследователь осуществляет поимку убегающего.

---

<sup>1</sup> Отображение – это закон (правило), по которому каждому элементу одного множества сопоставляется определённый элемент другого множества.

Содержательная постановка задачи 2 может быть такой: найти удаление рубежа перехвата истребителя-перехватчика, при котором в случае захода бомбардировщика противника в прикрываемую зону он будет поражен.

При рассмотрении задачи со стороны убегающего предполагается, что убегающий в момент времени  $t$  знает:

- динамические возможности игроков (т. е. их уравнения движения и множество допустимых управлений);
- начальное состояние игры  $z(0)$ ;
- управление догоняющего  $u(s)$  при  $s \in [0, t]$ .

Отображение  $v(t) = V(z(0), u(\cdot))$ , задаваемое на множестве произвольных интегрируемых функций  $u(t) \in Q$ ,  $t \geq 0$ , будет определять стратегию убегающего. Также потребуем, чтобы для произвольной измеримой  $u(t) \in Q$ ,  $t \geq 0$ , функция  $v(t) = V(z(0), u(\cdot))$  была измерима по  $t$  и  $v(t) \in Q$ .

В этом случае формулируем задачу убегания в следующем виде.

**Задача 3.** Найти множество начальных позиций  $z(0)$ , для которых убегающий обладает такой стратегией  $V$ , что она обеспечивает бесконечное время преследования догоняющим, что означает для произвольной функции  $u \in Q$  все будущие позиции  $z(t) \notin M$  для всех  $t \geq 0$ . Если такие позиции  $z(0)$  существуют, то их называют решениями задачи 3. Содержательно ищется безопасный рубеж захода бомбардировщика в район бомбометания.

**Задача 4.** Для дифференциальной игры с заданным терминальным множеством  $M$  найти такую глобальную стратегию убегающего, что из всех начальных позиций  $z(0) \notin M$  эта стратегия обеспечивала бы бесконечное время преследования. Стратегия, полученная при решении задачи 4, называется *глобальной стратегией убегания*.

Содержательная постановка задачи 4: Найти такую точку входа в позицию атаки, чтобы она обеспечивала уклонение от множества возможных атак противника.

Выше приведены основные постановки, возникающие при формализации задач в теории дифференциальных игр. Практические приложения зачастую накладывают более разнообразные условия на возможности игроков, а именно на знание в каждый момент времени управлений игроков. Более того знание игроками функций управления как функций, зависящих от времени в качестве чистых стратегий, делает невозможным достижения цели игры при изменении стратегии поведения, например, убегающего. Поэтому стратегии игры стремятся найти как функции текущих позиций игроков. Такой *позиционный способ управления* использует процедуры управления с поводырем Н. Н. Красовского и А. И. Субботина [189].

Рассмотрим решение задачи 1. Задачу о преследовании в парной дифференциальной игре будем рассматривать на заданных скоростях движения игроков при условии  $u_P > v_E$  (модуль скорости преследователя больше модуля скорости убегающего) и т. н. ограничениях на разворот (на «угловые скорости»). Задача решается с использованием динамического программирования. Найденные (см. [336]) оптимальные законы управления позволяют по ним построить оптимальные траектории, которые состоят из двух типов кривых – окружностей радиусов  $R_P = u_P/u_{\max}$ ,  $R_E = u_E/u_{\max}$  и отрезков прямых (рис. 6.3.2).

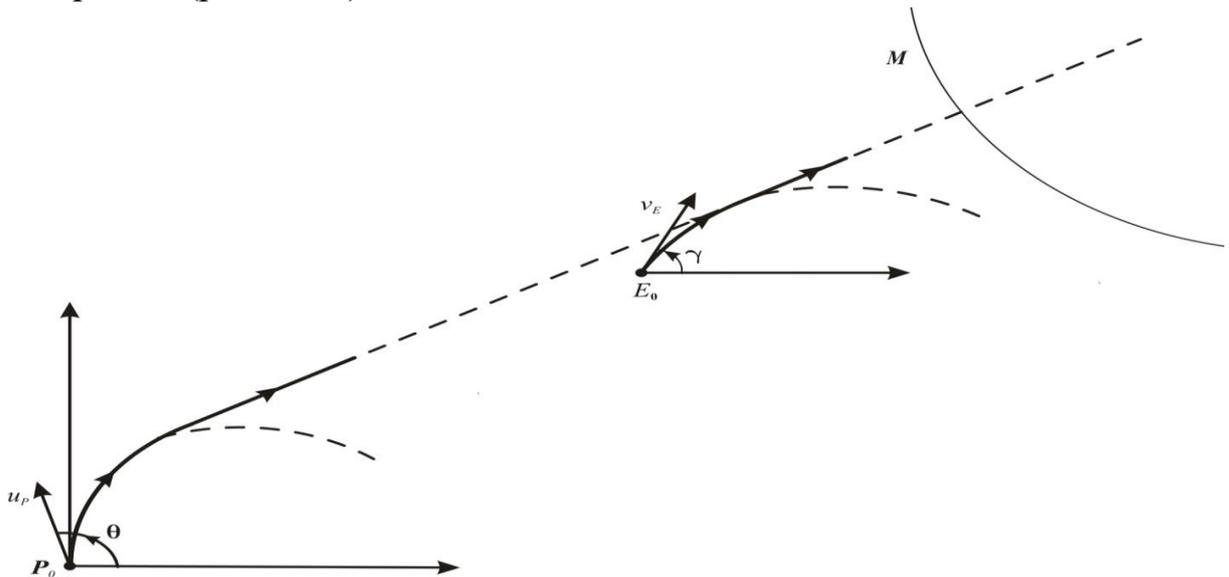


Рис. 6.3.2. Оптимальные траектории игроков

Таким образом, теория дифференциальных игр позволяет находить оптимальные методы преследования (уклонения) в зависимости от обстановки (информации игроков о противнике), в т. ч. в случае нескольких убегающих/догоняющих – см. [5; 10; 119; 149; 287; 308; 367].

#### 6.4. Оптимизационные и теоретико-игровые модели боевых действий в воздухе

В настоящем разделе рассмотрены оптимизационные задачи (в которых можно пренебречь действиями противника или они не существенны, т. е. не оказывают значимого влияния на результат), решаемые методами выпуклого и линейного программирования; подходы к решению многокритериальных задач. Значительное внимание уделено теоретико-игровым моделям боевых действий в воздухе.

### 6.4.1. Задачи выпуклой, линейной и многокритериальной оптимизации

В хрестоматийной работе В. Р. Дурова [138] рассматриваются решения следующих оптимизационных задач:

- выбор истребителя-перехватчика из нескольких типов для решения конкретной боевой задачи по критерию отношения эффективности к стоимости;
- нахождение рационального состава комбинированного боекомплекта, оптимального режима и последовательности пуска ракет, распределение боекомплекта по дальностям пуска и последовательным атакам;
- поиск оптимальных решений при определении состава самолетного парка разнотипной авиационной группировки, размещение ее по зонам боевых действий и местам базирования;
- обоснование оптимального запаса ракет или любых других агрегатов, обеспечивающих заданный уровень боевой готовности перехватчиков и др.

В названных и других практических приложениях возникает *задача оптимизации* – найти максимум (минимум) целевой функции  $f(x)$ , зависящей от вектора  $x$  переменных (включая управляемые), на который наложено ограничение  $x \in X$  (см. раздел 1.3.3):

$$f(x) \rightarrow \max_{x \in X} \text{ или } f(x) \rightarrow \min_{x \in X}. \quad (6.4.1)$$

Для перехода от задачи минимизации к задаче максимизации (и наоборот) достаточно поменять знак целевой функции.

Задача (6.4.1) является предметом изучения такой дисциплины, как *математическое программирование*, частные задачи и методы решения зависят от структуры целевой функции  $f(x)$  и множества  $X$ . Например, если множество  $X$  и функция  $f(x)$  выпуклы<sup>1</sup>, то имеем задачу *выпуклой оптимизации*, см. [94; 230]. Ее частный случай – *линейное программирование* (целевая функция линейна, а ограничения заданы системой линейных равенств и неравенств).

Пример выпуклого множества – стандартный симплекс (в задачах моделирования боевых действий часто используется как ограничение на ресурсы):

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1, \quad x_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n.$$

Примеры выпуклых функций: прямая  $y = ax + b$ , экспонента  $y = e^x$  и т. д.

<sup>1</sup> Множество  $X$  называется выпуклым, если для любых двух точек, принадлежащих этому множеству, отрезок, соединяющий эти точки, целиком принадлежит множеству  $X$ . У выпуклой функции  $f(x)$  отрезок, соединяющий любые две точки  $(x, f(x))$  и  $(y, f(y))$ , лежит не ниже графика функции.

Рассмотрим оптимизационную задачу с линейной целевой функцией и линейными функциями-ограничениями – *задачу линейного программирования*:

$$L = \sum_{i=1}^n c_i x_i \rightarrow \min,$$

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i \geq b_j, \quad j = 1, \dots, m,$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n.$$
(6.4.2)

Приведем текстовое описание задачи линейного программирования (ЛП): необходимо найти минимум или максимум линейной функции множества переменных  $x_i, i = 1, \dots, n$  на выпуклом многограннике (задаваемом конечной системой линейных неравенств<sup>1</sup>).

К задаче ЛП при некоторых допущениях и ограничениях сводятся многие задачи планирования и ведения боевых действий:

- поиск оптимального распределения истребителей (средств ПВО) и авиационных средств поражения (боеприпасов) по целям;
- транспортная задача (поиск оптимального плана перевозок для доставки боеприпасов и ГСМ со складов (баз) на аэродромы);
- и т. д.

В начале 1980-х гг. считалось, что решение задачи ЛП находится на первом месте в мире среди всех математических задач по числу затраченного компьютерного времени [94]. Приоритет в создании теории и моделей задач ЛП принадлежит советскому математику Л. В. Канторовичу (его работа «Математические методы организации и планирования производства» была опубликована в 1939 г., а на английском языке – в 1960 г.). С появлением компьютеров и развитием теории ЛП впервые в истории управленцы получили мощный метод поиска оптимальных решений из огромного числа возможных вариантов. Линейное программирование открыло дорогу к практическому выполнению расчетов, направленных на оптимизацию использования ресурсов во всех секторах экономики и оборонно-промышленном комплексе. Значительный вклад в стремительное развитие ЛП внес Дж. фон Нейман, связав основную задачу теории матричных игр с нулевой суммой (теорему о минимаксе) с линейным программированием [94].

Теория ЛП как раздел дисциплины «исследование операций» вызвала большой интерес у военных специалистов. Ныне классическая задача ЛП об оптимальной диете возникла в американской армии в 1930-1940-е гг. Задача о

---

<sup>1</sup> Равенство есть частный случай нестрогого неравенства.

диете (другой ее вариант – *задача о рюкзаке*) ставилась так: выбрать суточный набор продуктов питания военнослужащих минимальной стоимости (в выражении (6.4.2) коэффициент  $c_i$  есть стоимость единицы  $i$ -го продукта), который будет обеспечивать необходимую норму питательных веществ. Задача решалась для  $n = 77$  продуктов при девяти ограничениях (суммарное количество калорий, витаминов и т. д. не должно быть ниже нормы  $b_j, j = 1, \dots, 9$ ).

Частный случай задачи ЛП – *транспортная задача* (или задача о перевозках, о целераспределении и т. д.). Пусть имеется  $m$  баз (складов) и  $n$  аэродромов (пунктов потребления). Запасы груза на базах:  $a_1, a_2, \dots, a_m$ . Аэродромы подали заявки на  $b_1, b_2, \dots, b_n$  единиц груза. Заявки выполнимы, если сумма всех заявок не превосходит суммы всех имеющихся запасов:

$$\sum_{j=1}^n b_j \leq \sum_{i=1}^m a_i.$$

Базы связаны с аэродромами сетью дорог (включая воздушные маршруты). Стоимость (время или иной показатель) доставки единицы груза с  $i$ -й базы на  $j$ -й склад равна  $c_{ij}$  ( $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$ ). Требуется составить план перевозок  $x_{ij}$  (количество единиц груза, направляемое с  $i$ -й базы на  $j$ -й склад) так, чтобы все заявки были выполнены, а стоимость (время) доставки всех грузов было бы минимально, т. е. решить задачу:

$$L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \tag{6.4.3}$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = 1, \dots, n.$$

Заметим, что некоторые грузы не могут заказываться и доставляться частями (авиационные двигатели, боеприпасы и т. д.). В этом случае добавляется ограничение целочисленности на перевозки. Частным случаем транспортной задачи характеризуемым целочисленностью допустимых транспортных потоков, является т. н. *задача о назначении*, также являющаяся хрестоматийной для исследования операций.

Алгоритмы решения задач типа (6.4.2) и (6.4.3) реализованы во всех математических пакетах.

Решением задач, подобных (6.4.3) и их усложненным аналогов, занимается *теория оптимального транспорта*, использующая методы теории вероятностей, математического анализа и оптимизации. Эта теория стала популярной в последние десятилетия вследствие ее успешных применений для решения ряда задач большой размерности: машинное обучение, сравнительный анализ и обработка изображений и т. д. [94].

Рассмотрим *пример* задачи выпуклой оптимизации. В хрестоматийной работе В. А. Абчука и В. Г. Суздаля [7] приведена следующая задача. После аварии ЛА его надо обнаружить не позднее, чем за время  $T$ . Известно, что он находится в одном из  $n$  районов с вероятностями  $\pi_1, \dots, \pi_n$ , а вероятность обнаружения ЛА в  $i$ -м районе равна (см. раздел 6.2.1)

$$p(t_i) = 1 - e^{-\gamma_i t_i},$$

где  $t_i$  – время поиска ЛА в  $i$ -м районе,  $\gamma_i$  – интенсивность поиска в этом районе.

Вероятность обнаружения ЛА во всей области воздушного поиска равна

$$f(t) = \sum_{i=1}^n \pi_i (1 - e^{-\gamma_i t_i}), \quad t = (t_1, \dots, t_n). \quad (6.4.4)$$

Требуется максимизировать (6.4.4) при выполнении ограничений

$$\sum_{i=1}^n t_i = T, \quad t_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n. \quad (6.4.5)$$

Задаче максимизации (6.4.4) соответствует задача минимизации выпуклой функции (экспонента – выпуклая функция, неотрицательная взвешенная сумма выпуклых функций выпукла)

$$g(t) = \sum_{i=1}^n \pi_i e^{-\gamma_i t_i}. \quad (6.4.6)$$

Запишем функцию Лагранжа для задачи (6.4.6) с ограничением (6.4.5)

$$L(t, \lambda) = \sum_{i=1}^n \pi_i e^{-\gamma_i t_i} + \lambda \left( \sum_{i=1}^n t_i - T \right), \quad (6.4.7)$$

где  $\lambda$  – множитель Лагранжа.

Для нахождения решения вычислим частные производные от (6.4.7) по всем переменным  $\{t_i\}$  и приравняем их к нулю:

$$\frac{\partial}{\partial t_i} L(t, \lambda) = -\pi_i \gamma_i e^{-\gamma_i t_i} + \lambda = 0, \quad i = 1, \dots, n$$

или

$$t_i = \frac{\ln(\pi_i \gamma_i) - \ln \lambda}{\gamma_i}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (6.4.8)$$

С учетом ограничения (6.4.5) имеем

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{\ln(\pi_i \gamma_i) - \ln \lambda}{\gamma_i} = \sum_{i=1}^n \frac{\ln(\pi_i \gamma_i)}{\gamma_i} - \ln \lambda \sum_{i=1}^n \frac{1}{\gamma_i}$$

или

$$\ln \lambda = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\ln(\pi_i \gamma_i)}{\gamma_i} - T}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\gamma_i}} \quad (6.4.9)$$

и должны выполняться условия неотрицательности:  $t_i \geq 0, i = 1, \dots, n$ . Из (6.4.9) можно найти значение  $\lambda$ , и, подставив его в (6.4.8), вычислить оптимальные времена поиска в каждом из районов.

Исходные данные и результаты расчетов представлены в табл. 6.4.1 при  $T = 10$  час.

Таблица 6.4.1. Исходные данные и результаты расчетов (поиск ЛА)

| № района | Вероятность нахождения ЛА, $\pi_i$ | Интенсивность поиска, $\gamma_i$ | Оптимальное время поиска, $t_i^*$ |
|----------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 1        | 0,27                               | 0,51                             | 3,48                              |
| 2        | 0,31                               | 0,65                             | 3,31                              |
| 3        | 0,42                               | 0,85                             | 3,21                              |

Затем подставляем найденные оптимальные значения времени поиска в целевую функцию (6.4.4):  $f(t) \approx 0,89$ . Таким образом, за время воздушного поиска  $T = 10$  часов с вероятностью 0,89 летательный аппарат будет обнаружен в области поиска.

Если для какого-то района получилось отрицательное время поиска<sup>1</sup> (что возможно при малых значениях параметров  $\pi_i$  и  $\gamma_i$  в этом районе), то следует уточнить вероятности нахождения ЛА в районах, по возможности привлечь для воздушного поиска более эффективное средство. Если в результате уточнения данных опять в одном из районов время поиска окажется отрицательным, то этот район следует исключить из области поиска и повторить решение задачи.

Поскольку исходные данные в задачах оптимизации и принятия решений имеют ту или иную погрешность, важной частью решения этих задач является **анализ чувствительности** (sensitivity analysis) – оценка влияния изменения исходных данных (параметров) задачи на ее конечный результат (оптимальное или равновесное решение).

Применительно к рассмотренной задаче воздушного поиска желательно посмотреть, как влияет изменение вероятностей нахождения искомого объекта и интенсивностей его поиска в районах на оптимальное распределение времени поиска по районам. В общем случае данная задача может решаться

<sup>1</sup> Для упрощения расчетов при составлении функции Лагранжа не учтено условие неотрицательности значений времени поиска в районах.

аналитически (с использованием ряда Тейлора и отсечением всех членов выше первого порядка или с использованием множителей Лагранжа) или численно.

С использованием теории планирования эксперимента [224] найдем вклад отмеченных факторов (вероятности  $\pi_i$  и интенсивности  $\gamma_i$ ,  $i = 1, 3$ ) на оптимальное время поиска в 1-м и 3-м районах.

Для 1-го района возьмем два значения вероятности  $\pi_1$ : 0,22 (нижний уровень) и 0,32 (верхний уровень), изменив при этом вероятности в других районах на 0,025, чтобы сумма вероятностей нахождения объекта во всех районах осталась равной единице. Также возьмем два значения интенсивности  $\gamma_1$ : 0,46 и 0,56.

Аналогично по 3-му району примем для  $\pi_3$ : 0,37 и 0,47, для  $\gamma_3$ : 0,8 и 0,9. Результаты вычислений для 1-го района показаны в таблице 6.4.2.

Таблица 6.4.2. Результаты факторного анализа для 1-го района

| № эксперимента | $x_1 / \pi_1$ | $x_2 / \gamma_1$ | $t_1$ |
|----------------|---------------|------------------|-------|
| 1              | -1 / 0,22     | -1 / 0,46        | 3,233 |
| 2              | 1 / 0,32      | -1 / 0,46        | 3,858 |
| 3              | -1 / 0,22     | 1 / 0,56         | 3,096 |
| 4              | 1 / 0,32      | 1 / 0,56         | 3,654 |

Нижним значениям показателей соответствуют значения факторов  $-1$ , верхним  $+1$ . *Функция отклика* (линейная модель наблюдений) имеет вид:

$$\eta_1 = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2, \quad \alpha_0 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 t_i, \quad \alpha_1 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_1 t_i, \quad \alpha_2 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_2 t_i.$$

В результате вычислений получено:

$$\eta_1 = 3,46 + 0,3x_1 - 0,09x_2.$$

Таким образом, вес 1-го фактора (вероятности нахождения объекта в 1-м районе) равен  $+0,3$ , а вес 2-го равен  $-0,09$ . Большой по абсолютной величине вес оказывает большее влияние на изменение оптимального времени поиска в районе; положительное значение веса  $\alpha_1$  означает, что увеличение вероятности  $\pi_1$  с 0,22 до 0,32 требует увеличения времени поиска, а увеличение интенсивности  $\gamma_1$  с 0,46 до 0,56 требует уменьшения времени поиска в этом районе.

Для 3-го района получим следующую функцию отклика:

$$\eta_3 = 3,21 + 0,18x_1 - 0,09x_2.$$

Таким образом, в условиях примера для получения более точного оптимального плана воздушного поиска следует в первую очередь минимизи-

ровать ошибки оценки вероятностей нахождения искомого объекта в районе поиска. Данный вывод подтверждается множеством примеров воздушного поиска летательных аппаратов, потерпевших аварии.

Рассмотрим *задачу* [138, с. 263-264]. Для отражения массированного налета на малых, средних и больших высотах необходимо поднимать в воздух одновременно 50 перехватчиков МиГ-31, 30 перехватчиков Су-35 и 45 типа МиГ-29. Для размещения потребного количества перехватчиков используются два аэродрома. Среднее время взлета в секундах одного перехватчика данного типа с соответствующего аэродрома приведено в таблице 6.4.3.

Таблица 6.4.3. Время взлета перехватчиков с аэродромов (данные условны)

| № аэродрома | Тип перехватчика |           |            |
|-------------|------------------|-----------|------------|
|             | 1 (МиГ-29)       | 2 (Су-35) | 3 (МиГ-31) |
| 1           | 4                | 10        | 10         |
| 2           | 6                | 8         | 20         |

Как следует разместить перехватчики по аэродромам, чтобы время последовательного взлета всего потребного для выполнения боевого задания наряда было минимально?

Пусть  $x_{ij}$  – искомое количество перехватчиков  $i$ -го типа, размещенных на  $j$ -м аэродроме, а  $c_{ij}$  – время взлета перехватчика  $i$ -го типа с  $j$ -го аэродрома. Имеем задачу нелинейного программирования, где  $x_{ij}$  являются целыми неотрицательными числами:

$$L = \max \left( \sum_{i=1}^3 c_{i1} x_{i1}, \sum_{i=1}^3 c_{i2} x_{i2} \right),$$

$$x_{11} + x_{12} = 50, \quad x_{21} + x_{22} = 30, \quad x_{31} + x_{32} = 45,$$

$$x_{ij} \in \mathbb{N}, \quad i = 1, 2, 3, \quad j = 1, 2.$$

Решение задачи с помощью электронной таблицы показано на рис. 6.4.1.

| Время взлета перехватчиков с аэродромами |            |            |            |
|--|------------|------------|------------|
| № аэродр.                                | 1 (МиГ-29) | 2 (Су-35)  | 3 (МиГ-31) |
| 1  | 4          | 10         | 10         |
| 2  | 6          | 8          | 20         |
| Количество перехватчиков на аэродромах   |            |            |            |
| № аэродр.                                | 1 (МиГ-29) | 2 (Су-35)  | 3 (МиГ-31) |
| 1  | <b>9</b>   | <b>0</b>   | <b>45</b>  |
| 2  | <b>41</b>  | <b>30</b>  | <b>0</b>   |
| Всего                                    | 50         | 30         | 45         |
| Ограничения:                             | 50         | 30         | 45         |
| <b>Целевая функция:</b>                  |            | <b>486</b> |            |

Рис. 6.4.1. Оптимальное размещение перехватчиков по аэродромам

Таким образом, на первом аэродроме надо разместить 9 МиГ-29 и 45 МиГ-31, остальные перехватчики размещаются на втором аэродроме. При этом суммарное время последовательного взлета будет равно 486 сек.

**Задачи «эффективность-живучесть».** Это обширный класс задач вида  $f(x) = h(x) g(x)$ , где:  $h(x)$  – функция эффективности,  $g(x)$  – функция живучести,  $x$  – вектор параметров и управлений, – применяемых в самых разных сферах деятельности (военное дело, безопасность, экономика, промышленность и т. д.).

В. Р. Дуров [138] предложил формулировку и решение следующей задачи: перехватчик осуществляет в некотором районе поиск цели. Чем больше время поиска  $t$ , тем меньше вероятность выживания (непоражения) перехватчика. С другой стороны, чем больше время поиска, тем выше эффективность (вероятность обнаружения цели). Другие возможные формулировки:

- выбор высоты полета для удара по цели в тылу противника;
- выбор оптимального комплекта средств поражения для удара по назначенной цели;
- формирование оптимальной авиационной группировки для подавления ПВО противника и высадки воздушного десанта;
- и т. д.

Задачи «эффективность-живучесть» могут классифицироваться по: количеству исследуемых объектов (один или несколько), видам функций эффективности и живучести, методам моделирования и др.

В простейшем случае функции  $h(x)$  и  $g(x)$  могут задаваться известными распределениями (экспоненциальным, Вейбула, Парето и др.).

Пусть  $h(t)$  подчиняется экспоненциальному закону с интенсивностью поиска  $\lambda$  и временем  $t$  нахождения ЛА в районе поиска, а  $g(t)$  подчиняется распределению Парето с минимальным временем  $t_0$  реакции ПВО противника и параметром  $k$ :

$$h(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad g(t) = \left( \frac{t_0}{t} \right)^k, \quad t \geq t_0.$$

Данная задача решается численно. Возможны три принципиально разных решения (при  $t_0 = 5$  минут и  $\lambda = 0,1$  мин.<sup>-1</sup>): А) функция  $f(t)$  со временем возрастает ( $k = 0,25$ ); Б) имеется оптимальное значение времени действий ( $k = 0,5$ ); В) функция  $f(t)$  со временем убывает ( $k = 1$ ), действия в назначенном районе нецелесообразны (рис. 6.4.2).

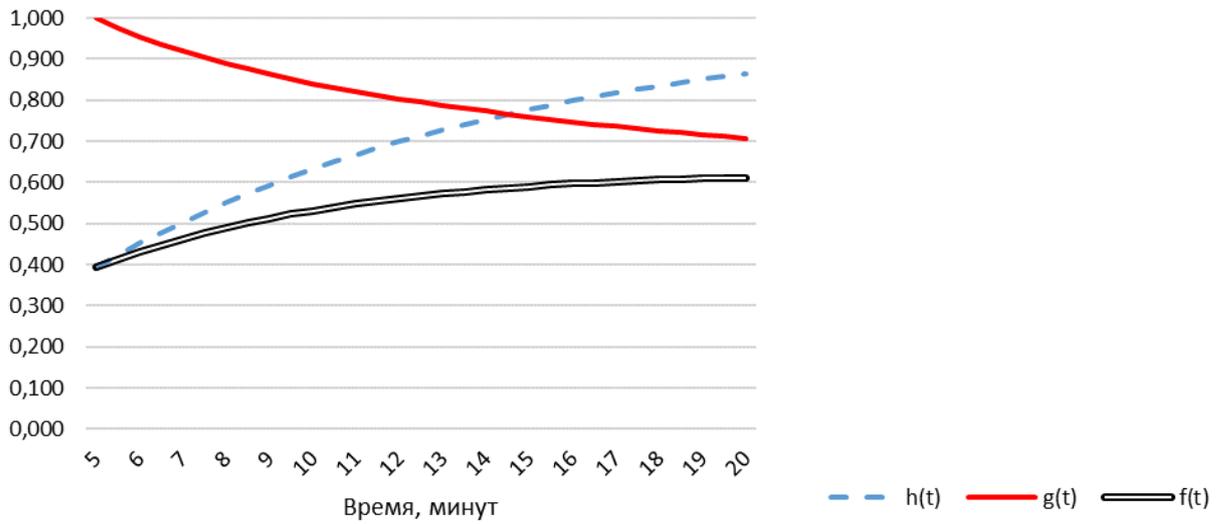
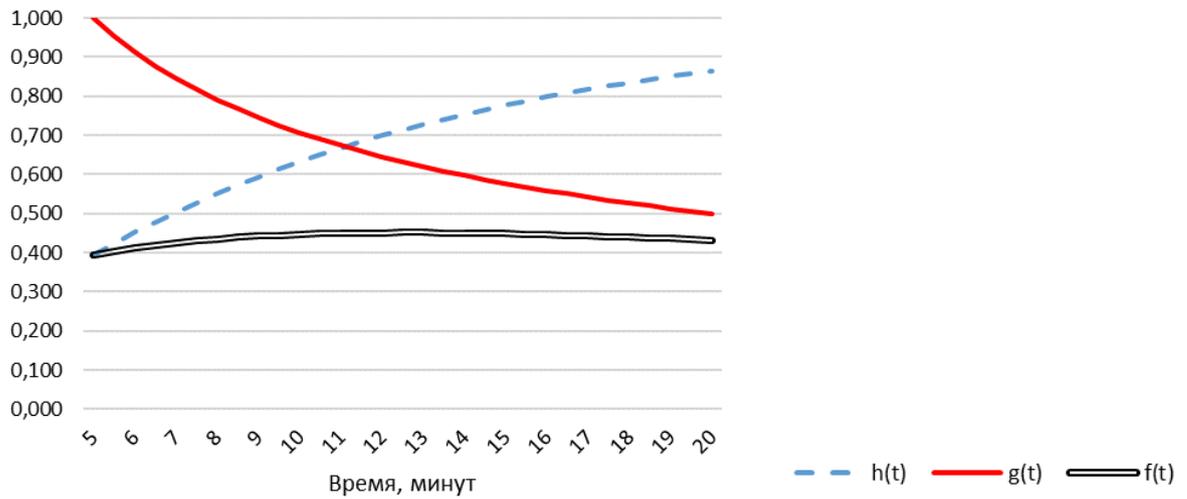
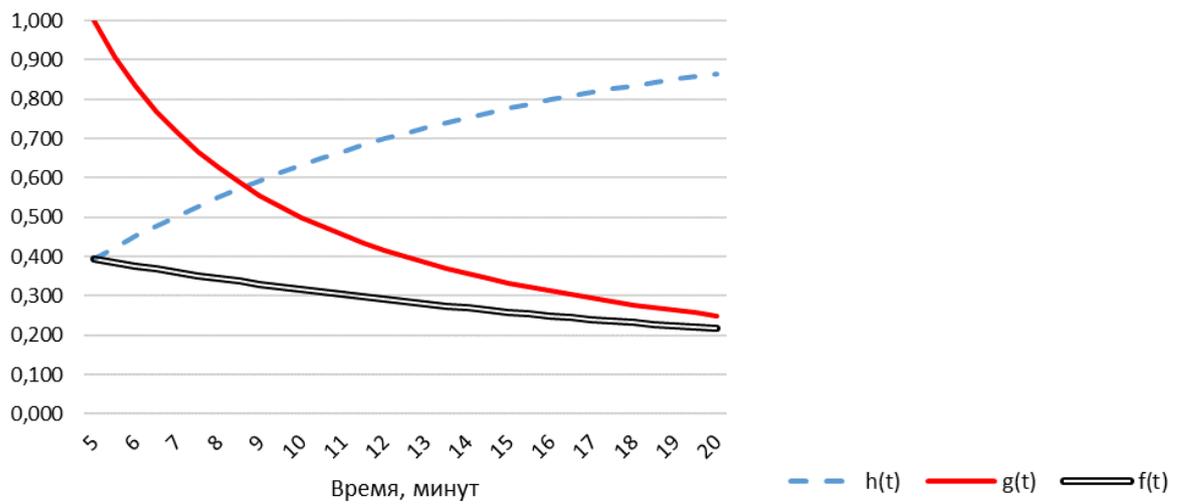
A)  $k = 0,25$ Б)  $k = 0,5$ В)  $k = 1$ 

Рис. 6.4.2. Задача «эффективность-живучесть»

**Многокритериальная оптимизация** возникает, когда в ходе боевых действий и при решении военно-экономических задач преследуется несколько целей. Например, заказчик стремится, чтобы истребитель был эффективным, малозаметным и не очень дорогим.

Для решения многокритериальных задач обычно применяются следующие методы [375]:

- *метод свертывания* – лицо, принимающее решения (руководитель), сводит многокритериальную задачу к задаче с одним критерием (линейная свертка критериев с «весами», мультипликативная свертка и др.);

- *метод ограничений* – некоторые критерии переводятся в ограничения;

- *метод анализа иерархий* – на основании суждений экспертов оценивается вклад каждого критерия в общую оценку;

- *метод уступок* – ЛПР выбирает решение путем постепенного ослабления первоначальных требований, как правило, одновременно невыполнимых;

- *метод идеальной точки* – в области допустимых значений неизвестных ищется такая их совокупность, которая способна обеспечить набор значений критериев, в том или ином смысле ближайший к наилучшему, как правило, недостижимому (в так называемой точке утопии).

Перечисленные методы решения многокритериальных задач фактически означают, что ЛПР *субъективно*, исходя из тех или иных соображений, формирует *новый критерий оптимальности*.

Известно, что процесс целеполагания является довольно сложным процессом, имеющим свои собственные стадии и этапы, методы и средства. В категориях системного анализа процесс целеполагания определяется как проектирование [252, с. 9], в военной науке – как выработка замысла.

В общем случае цели могут быть: а) конкурирующими (достижение одной цели снижает степень достижения другой), б) кооперирующимися (при достижении одной цели повышается степень достижения другой), в) взаимно нейтральными. Если целей больше двух, то отношения между ними можно представить, например, в виде графа.

Конкурирующие цели можно достаточно объективно свести в единый критерий оптимальности путем произведения соответствующих целевых функций, если они определены как вероятности (см. критерий «эффективность-живучесть»).

Сложнее ситуации, когда критерии имеют различную размерность. В этом случае часто за счет нормировки их делают безразмерными (если известны их минимально и максимально возможные значения). После нормировки часто используют линейную свертку с неотрицательными весами,

переводя тем самым неопределенности в значимости критериев в неопределенность, связанную с назначенными значениями весов, которые в общем случае могут быть различны для разных областей значений критериев. Например, вероятности поражения наземных целей 0,1-0,2 (беспокоящий огонь), 0,5-0,6 (поражение групповой цели) и 0,8-0,9 (уничтожение важной одиночной цели) являются качественно разными и для них необоснованно применять один и тот же весовой коэффициент.

Одним из наиболее субъективных и спорных критериев оптимальности является критерий «эффективность-стоимость»<sup>1</sup>. Обычно задачи с использованием данного критерия решаются путем нахождения границы Парето (см. [295]). Но при решении подобных задач следует привлекать и другие критерии, например, связанные с массовостью выпуска военной продукции.

Оптимизационные задачи применяются, когда результат тех или иных действий не зависит от решения (действий) противника, или таким решением можно пренебречь, или хотя бы частично устранить неопределенности, связанные с действиями противника, при формулировке оптимизационной задачи. Иначе следует применять методы теории игр (см. разделы 4.3 и 5.2).

#### ***6.4.2. Теоретико-игровые модели боевых действий в воздухе***

Рассмотрим применение теоретико-игровых методов для обоснования элементов замысла на боевые действия в воздухе (см. также приложение 2). Важнейшей задачей командиров и штабов является прогнозирование направления главного удара противника для организации эффективной защиты своих войск и важных объектов от воздушных ударов противника, а также направления сосредоточения основных усилий его авиации и ПВО.

В хрестоматийной работе В. Р. Дурова [138] рассматриваются следующие теоретико-игровые задачи:

– воздушный бой перехватчика с истребителем-бомбардировщиком (матричная антагонистическая игра  $3 \times 2$ );

---

<sup>1</sup> Когда разрабатываемые образцы вооружения стали рассматривать по показателю «эффективность/стоимость», то преимущество нередко относилось к более дешёвым и менее эффективным образцам. На это Е. С. Вентцель заметила: «По критерию эффективность/стоимость можно подешевле проиграть войну». – URL: [https://руни.рф/Вентцель,\\_Елена\\_Сергеевна](https://руни.рф/Вентцель,_Елена_Сергеевна) (дата обращения: 01.08.2024).

– определение оптимального варианта вооружения перехватчика и наилучшего вида противодействия бомбардировщика (матричная антагонистическая игра  $3 \times 3$ , решение в области смешанных стратегий);

– определение оптимального варианта назначения наряда перехватчиков (из двух типов) и оптимального варианта использования противником своих бомбардировщиков (из трех типов), матричная антагонистическая игра  $2 \times 3$ , решение в области смешанных стратегий;

– определение оптимального состава перехватчиков для решения задач ПВО от воздушных целей противника (матричная антагонистическая игра  $4 \times 4$ , решение методом итераций);

– и др. матричные антагонистические игры.

Метод решения перечисленных задач ясно и просто изложен в работе Е. С. Венцель [78]. Начиная с 1970-х гг. для моделирования боевых действий в воздухе стали применяться и другие виды игр (непрерывные, иерархические, дифференциальные и др.).

Рассмотрим решение матричных антагонистических игр с конечным числом стратегий сторон путем сведения игры к двум задачам линейного программирования.

**Задача** [138, с. 251]. Противник в налете через рубеж ПВО может использовать 4 типа средств воздушного нападения. Обороняющая рубеж ПВО авиационная группировка имеет 4 типа перехватчиков. Эффективность каждого перехватчика против каждого типа СВН характеризуется матрицей, где  $A_1$ – $A_4$  – стратегии ПВО (номер типа перехватчика),  $B_1$ – $B_4$  – стратегии противника, номера типов СВН (табл. 6.4.4).

Таблица 6.4.4. Матрица игры «ПВО-противник»

|       | $B_1$ | $B_2$ | $B_3$ | $B_4$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| $A_1$ | 4     | -2    | -1    | -2    |
| $A_2$ | 0     | 2     | 3     | 2     |
| $A_3$ | 3     | 0     | 0     | 1     |
| $A_4$ | 2     | 2     | 1     | 1     |

Элемент матрицы  $a_{ij}$  – математическое ожидание числа сбитых целей одним перехватчиком за один вылет (отрицательные числа означают потерю перехватчика: «-2» – полная, безвозвратная, «-1» – временный выход из строя с последующим восстановлением) при применении стратегий  $A_i$  и  $B_j$ .

Игра является антагонистической – наш выигрыш есть проигрыш противника, и с одновременным и независимым выбором стратегий (поскольку продолжительности циклов действий сторон примерно одинаковы).

Отметим, что вместе с заполненной матрицей игры штабу (оператору) целесообразно подготовить схему и сценарии боевых действий, методику и результаты расчетов по определению математических ожиданий числа сбитых целей.

Порядок решения игры следующий.

Шаг 1 (*наличие доминирующих стратегий*). Проверяем у сторон наличие доминирующих стратегий (стратегий, которые дают выигрыш при любых действиях противника не хуже любой другой стратегии). Например, если бы у первой стороны была стратегия  $A_5 = (4, 2, 2, 1)$ , то она являлась бы доминирующей. В этом случае имелось бы *равновесие в доминирующих стратегиях* (РДС) и значение игры (выигрыш первой стороны) было бы равно  $a_{54} = 1$ . В отсутствие доминирующих стратегий переходим к шагу 2.

Шаг 2 (*исключение доминируемых стратегий*). Проверяем у сторон наличие доминируемых стратегий<sup>1</sup>. Если таковые найдутся, то их следует исключить. После исключения доминируемых стратегий переходим к следующему шагу.

Шаг 3 (*применение аффинного правила*). Если элементы матриц  $A$  и  $C$  связаны равенствами

$$c_{ij} = \lambda a_{ij} + \mu, \quad i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n,$$

где  $\lambda > 0$ , а  $\mu$  – произвольно, то оптимальные стратегии сторон у соответствующих матричных игр одинаковы, а значение игры подчиняется следующему условию

$$v_C = \lambda v_A + \mu.$$

Применяем аффинное правило (увеличиваем все элементы матрицы на  $\mu = 3$ ) и получаем преобразованную матрицу игры (табл. 6.4.5).

Таблица 6.4.5. Преобразованная матрица игры «ПВО-противник»

|       | $B_1$ | $B_2$ | $B_3$ | $B_4$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| $A_1$ | 7     | 1     | 2     | 1     |
| $A_2$ | 3     | 5     | 6     | 5     |
| $A_3$ | 6     | 3     | 3     | 4     |
| $A_4$ | 5     | 5     | 4     | 4     |

Шаг 4 (*общее решение матричной антагонистической игры  $m \times n$* ). Для первой стороны (ПВО) оптимальные стратегии находятся как решение задачи линейного программирования:

<sup>1</sup> Доминируемая стратегия – это стратегия, для которой найдется хотя бы одна доминирующая стратегия.

$$\sum_{i=1}^m x_i \rightarrow \min,$$

$$\sum_{i=1}^m c_{ij} x_i \geq 1, j = 1, \dots, n,$$

$$x_i = \frac{p_i}{v}, i = 1, \dots, m,$$
(6.4.10)

где:  $v$  – значение игры,  $p_i$  – частота применения первой стороной  $i$ -й стратегии.

Для противника оптимальные стратегии находятся как решение *двойственной задачи* линейного программирования:

$$\sum_{j=1}^n y_j \rightarrow \max,$$

$$\sum_{j=1}^n c_{ij} y_j \leq 1, i = 1, \dots, m,$$

$$y_j = \frac{q_j}{v}, j = 1, \dots, n,$$
(6.4.11)

где  $q_j$  – частота применения второй стороной (противником)  $j$ -й стратегии.

При этом значение игры равно  $v = 1/W$ ,  $W = \sum_{i=1}^m x_i^* = \sum_{j=1}^n y_j^*$ , где  $x_i^*$  и  $y_j^*$  – результаты решения задачи ЛП,  $p_i^* = \frac{x_i^*}{W}$ ,  $i = 1, \dots, m$ ,  $q_j^* = \frac{y_j^*}{W}$ ,  $j = 1, \dots, n$ .

Шаг 5 (*решение игры в электронной таблице или математическом пакете*). Результаты решения двух задач ЛП представлены на рис. 6.4.4.

|        | $B_1$ | $B_2$ | $B_3$ | $B_4$ | $x_i$ | $p_i$       |       | $B_1$       | $B_2$       | $B_3$       | $B_4$       | Огр-я |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| $A_1$  | 7     | 1     | 2     | 1     | 0,00  | <b>0,00</b> | $A_1$ | 7           | 1           | 2           | 1           | 0,61  |
| $A_2$  | 3     | 5     | 6     | 5     | 0,10  | <b>0,43</b> | $A_2$ | 3           | 5           | 6           | 5           | 1     |
| $A_3$  | 6     | 3     | 3     | 4     | 0,06  | <b>0,29</b> | $A_3$ | 6           | 3           | 3           | 4           | 1     |
| $A_4$  | 5     | 5     | 4     | 4     | 0,06  | <b>0,29</b> | $A_4$ | 5           | 5           | 4           | 4           | 1     |
| Огр-я: | 1     | 1     | 1,03  | 1     | 0,23  | 4,43        | $y_i$ | 0,06        | 0,03        | 0,00        | 0,13        | 0,23  |
|        |       |       |       |       |       |             | $q_i$ | <b>0,29</b> | <b>0,14</b> | <b>0,00</b> | <b>0,57</b> | 4,43  |

Рис. 6.4.4. Решение игры «ПВО-противник»

Шаг 6 (*переход к исходной матрице*). В преобразованной матрице значение игры равно 4,43. Для исходной матрицы игры это значение равно  $4,43 - 3 = 1,43$ . Таким образом, при применении оптимальных смешанных

стратегий выигрыш первой стороны (ПВО) – математическое ожидание числа сбитых целей одним перехватчиком за один вылет, – в среднем составит 1,43.

Шаг 7 (*реализация смешанных стратегий*). Чтобы добиться указанного выигрыша, первой стороне необходимо применять 2-ю стратегию с частотой 0,43, 3-ю и 4-ю – с 0,29. Противнику рационально применять свою 1-ю стратегию с частотой 0,29, 2-ю – с 0,14 и 4-ю – с 0,57. Если одна из сторон отклонится от своей оптимальной стратегии, то ее выигрыш уменьшится.

### 6.4.3. Распределение средств ПВО между районами (объектами)

Поскольку средства ПВО относительно малоподвижны (в сравнении с летательными аппаратами и ракетами противника) и имеют меньший радиус действия, то важнейшей военной и военно-экономической задачей является заблаговременное планирование прикрытия районов (объектов) от ударов с воздуха на ТВД, вблизи его и в глубине территории страны.

Порядок решения названной задачи может быть следующим.

*Шаг 1.* Выбирается зона (ТВД, где решающая роль принадлежит войсковой ПВО, прифронтовая территория или объекты и районы в глубоком тылу).

*Шаг 2.* Формируется список прикрываемых районов и объектов, оценивается степень их защищенности (с учетом выполненных и планируемых мероприятий по обеспечению их живучести) и важность  $V_i$  этих объектов (ожидаемый ущерб в случае их поражения),  $i = 1, \dots, n$ , где  $n$  – количество прикрываемых районов (объектов). Важности (или ценности) прикрываемых объектов обычно назначаются в безразмерных величинах в шкале отношений, наиболее важные и значимые объекты имеют большее значение показателя  $V_i$ .

*Шаг 3.* Оцениваются возможности противника по нанесению ударов с воздуха по каждому из объектов ( типовые средства поражения и их носители, места базирования и позиции, ожидаемое количество средств поражения, интенсивность ударов и т. д.).

*Шаг 4.* С учетом возможностей противника, имеющихся на вооружении средств ПВО/ПРО, характеристик объектов прикрытия (их площади и др.) уточняется агрегированная функция ПВО (см. выражение (6.2.32)) с вероятностью прикрытия  $i$ -го объекта

$$p_x(x_i, y_i) = \frac{\beta_i(x_i)^{\alpha_i}}{\beta_i(x_i)^{\alpha_i} + (y_i)^{\alpha_i}}, \quad (6.4.12)$$

где:  $x_i$  ( $y_i$ ) – стоимость средств ПВО (средств поражения), выделенных на  $i$ -й объект;  $\beta_i > 0$  – параметр, отражающий характеристики прикрываемого объекта (района) при использовании типовых средств поражения и прикryтия,  $\alpha_i > 0$  – параметр, отражающий качество средств поражения и средств ПВО на  $i$ -м объекте.

Военно-экономические возможности сторон (прикрывающей объекты и нападающей на них) отражаются следующими ограничениями:

$$\sum_{i=1}^n x_i = R_x, \quad \sum_{i=1}^n y_i = R_y. \quad (6.4.13)$$

*Шаг 5.* Выбор целевой функции и метода решения задачи оптимального прикryтия объектов (районов). Выигрыши сторон определяются следующим образом (полагается, что стороны одинаково оценивают важности объектов прикryтия, что можно объяснить доступностью результатов космического мониторинга):

$$F_x(x, y) = \sum_{i=1}^n V_i p_x(x_i, y_i), \quad F_y(x, y) = \sum_{i=1}^n V_i [1 - p_x(x_i, y_i)]. \quad (6.4.14)$$

В общем случае ограничения (6.4.13) могут быть «нежесткими» (в зависимости от обстановки у политического руководства и военного командования приоритеты планирования могут меняться), ценности  $V_i$  объектов также могут быть не четко определены и т. д. Тогда имеем задачу принятия решений в условиях *нечеткой информации* [273].

В условиях отсутствия неопределенностей нечеткого характера имеем классическую теоретико-игровую задачу (см. [253]), в которой стороны принимают решения одновременно и независимо друг от друга.

Для решения задачи (6.4.14) с ограничениями (6.4.13) воспользуемся методом множителей Лагранжа:

$$L_x(\lambda_x) = - \sum_{i=1}^n V_i p_x(x_i, y_i) + \lambda_x \left( \sum_{i=1}^n x_i - R_x \right), \quad (6.4.15)$$

$$L_y(\lambda_y) = - \sum_{i=1}^n V_i [1 - p_x(x_i, y_i)] + \lambda_y \left( \sum_{i=1}^n y_i - R_y \right),$$

где  $\lambda_x$  и  $\lambda_y$  – множители Лагранжа.

Вычислим частные производные от функций Лагранжа и приравняем их к нулю [253]

$$V_i \frac{\beta_i \alpha_i (x_i)^{\alpha_i - 1} (y_i)^{\alpha_i}}{[\beta_i (x_i)^{\alpha_i} + (y_i)^{\alpha_i}]^2} = \lambda_x, \quad i = 1, \dots, n,$$

$$V_i \frac{\beta_i \alpha_i (y_i)^{\alpha_i - 1} (x_i)^{\alpha_i}}{[\beta_i (x_i)^{\alpha_i} + (y_i)^{\alpha_i}]^2} = \lambda_y, \quad i = 1, \dots, n. \quad (6.4.15)$$

Разделив первое выражение (6.4.15) на второе, получим

$$\frac{y_i}{x_i} = \frac{\lambda_x}{\lambda_y} \text{ или } y_i = \frac{\lambda_x}{\lambda_y} x_i, i = 1, \dots, n. \quad (6.4.16)$$

С учетом ограничений (6.4.13) имеем

$$R_y = \sum_{i=1}^n y_i = \frac{\lambda_x}{\lambda_y} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{\lambda_x}{\lambda_y} R_x \text{ или } \frac{R_y}{R_x} = \frac{\lambda_x}{\lambda_y}. \quad (6.4.17)$$

Подставив  $y_i = \frac{R_y}{R_x} x_i$  в первое выражение (6.4.15), а  $x_i = \frac{R_x}{R_y} y_i$  во второе,

получим:

$$x_i = \frac{\beta_i \alpha_i (R_x R_y)^{\alpha_i} V_i}{\lambda_x [\beta_i (R_x)^{\alpha_i} + (R_y)^{\alpha_i}]^2}, i = 1, \dots, n, \quad (6.4.18)$$

$$y_i = \frac{\beta_i \alpha_i (R_x R_y)^{\alpha_i} V_i}{\lambda_y [\beta_i (R_x)^{\alpha_i} + (R_y)^{\alpha_i}]^2}, i = 1, \dots, n.$$

С учетом ограничений находим:

$$R_x = \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{\lambda_x} \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i \alpha_i (R_x R_y)^{\alpha_i} V_i}{[\beta_i (R_x)^{\alpha_i} + (R_y)^{\alpha_i}]^2}, \quad (6.4.19)$$

$$R_y = \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{\lambda_y} \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i \alpha_i (R_x R_y)^{\alpha_i} V_i}{[\beta_i (R_x)^{\alpha_i} + (R_y)^{\alpha_i}]^2}$$

или

$$\lambda_x = \frac{1}{R_x} \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i \alpha_i (R_x R_y)^{\alpha_i} V_i}{[\beta_i (R_x)^{\alpha_i} + (R_y)^{\alpha_i}]^2} = \frac{A}{R_x}, \quad (6.4.20)$$

$$\lambda_y = \frac{1}{R_y} \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i \alpha_i (R_x R_y)^{\alpha_i} V_i}{[\beta_i (R_x)^{\alpha_i} + (R_y)^{\alpha_i}]^2} = \frac{A}{R_y}.$$

Тогда оптимальные распределения сил и средств сторон по объектам равны:

$$x_i^* = \frac{\beta_i \alpha_i (R_x R_y)^{\alpha_i} V_i}{A [\beta_i (R_x)^{\alpha_i} + (R_y)^{\alpha_i}]^2} R_x, i = 1, \dots, n, \quad (6.4.21)$$

$$y_i^* = \frac{\beta_i \alpha_i (R_x R_y)^{\alpha_i} V_i}{A [\beta_i (R_x)^{\alpha_i} + (R_y)^{\alpha_i}]^2} R_y, i = 1, \dots, n.$$

Рассмотрим *пример*. Пусть имеется 3 объекта прикрытия. Возможности сторон и свойства объектов отражены в следующих показателях:  $V_1 = 10$ ,  $V_2 = 5$ ,  $V_3 = 15$ ,  $\beta_1 = 1$ ,  $\beta_2 = 2$ ,  $\beta_3 = 5$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1$ ,  $R_x = 300$ ,  $R_y = 100$ .

Результаты расчетов представим в виде таблицы:

| № объекта | Ожидаемый ущерб, $V_i$ | Параметр, $\beta_i$ | Доли от ресурса, % | $x_i^*$ | $y_i^*$ | $p_x$ |
|-----------|------------------------|---------------------|--------------------|---------|---------|-------|
| 1         | 10                     | 1                   | 58,9               | 294,65  | 58,93   | 0,83  |
| 2         | 5                      | 2                   | 17,5               | 87,66   | 17,53   | 0,91  |
| 3         | 15                     | 5                   | 23,5               | 117,69  | 23,54   | 0,96  |

Таким образом, в условиях примера сторонам выгодно выделить на 1-3 объекты следующие доли своих ресурсов: 58,9%, 17,5% и 23,5% (доли указаны с округлением). При этом вероятности успешного прикрытия объектов средствами ПВО будут равны 0,83, 0,91 и 0,96.

*Шаг 6.* Распределить по объектам имеющиеся силы и средства ПВО в соответствии с найденным решением и с учетом конкретных возможностей имеющихся сил и средств. С помощью имитационных моделей выполнить более детальные расчеты по оценке возможностей ПВО и при необходимости уточнить решение.

Рассмотренная теоретико-игровая задача оптимального распределения имеющихся сил и средств ПВО по объектам (районам) может служить основой для решения следующих задач более высокого уровня:

– задача нахождения потребных сил и средств ПВО объектов (районов) исходя из следующего критерия – предотвращенного ущерба за вычетом расходов на систему ПВО;

– задача частно-государственного партнерства, в которой предприятия (собственники) совместно с государственными органами управления проводят мероприятия по повышению живучести объектов в условиях возможности ударов по ним с воздуха.

Таким образом, в главе рассмотрен комплекс моделей боевых действий в воздухе, включая теоретико-вероятностные и теоретико-игровые модели. Они могут использоваться в форме электронных таблиц, элементов специального математического обеспечения автоматизированных систем управления войсками и оружием на фазах подготовки и ведения боевых действий.

## ГЛАВА 7. МОДЕЛИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ДЕЙСТВИЙ

Настоящая глава состоит из трех разделов. В первом представлен обзор моделей специальных действий (их классификация и характеристика). Во втором разделе рассмотрена игра «атакующий-защитник» и ее применение в задачах обеспечения безопасности и борьбы с терроризмом. В последнем разделе дано описание моделей борьбы с пиратством и терроризмом на море.

Материал главы не претендует на рассмотрение всех значимых решений в области моделирования специальных действий, а служит скорее введением и иллюстрацией их специфики.

### 7.1. Обзор моделей специальных действий

Одной из форм применения вооруженных сил являются *специальные операции* – совокупность согласованных по целям, задачам, месту и времени специальных действий войск (сил), проводимых по единому замыслу и плану для достижения определенных целей. *Специальные действия* войск (сил) – мероприятия проводимые специально назначенными, организованными, подготовленными и оснащенными силами, применяющими методы и способы боевых действий не характерные для обычных сил (разведывательно-диверсионные, подрывные, контртеррористические, контрдиверсионные, контрразведывательные, партизанские, антипартизанские и другие действия)<sup>1</sup>.

В вооруженных силах ряда государств созданы *силы специальных операций* – соединения, части и подразделения, предназначенные для ведения диверсионно-разведывательных действий, организации повстанческой деятельности и вооруженных нападений, включая оказание помощи иностранным государствам в обеспечении их внутренней безопасности<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Формы применения Вооруженных Сил Российской Федерации. – URL: <https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details.htm?id=14014> (дата обращения – 16.04.2024).

<sup>2</sup> Силы специальных операций (ССО). – URL: [https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details\\_rvsn.htm?id=14234%40morfDictionary](https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/details_rvsn.htm?id=14234%40morfDictionary) (дата обращения – 16.04.2024).

Для противодействия терроризму, пиратству, диверсиям создаются общегосударственные системы, включающие правоохранительные органы, вооруженные силы и т. д. (см., например, [174]).

Содержательные вопросы специальных действий (исторические сведения, мотивы, организация и тактика действий сторон и т. д.) подробно описаны в литературе [61; 143; 166; 276; 284; 304; 340]. В ряде работ подчеркивается значимость надежной охраны границ в борьбе с террористами, диверсантами и т. д.

На содержательном уровне, с одной стороны, имеются существенные различия между боевыми и специальными действиями (они обусловлены, в частности, асимметричным характером действий и информированности, направлены в защиту мирного населения и инфраструктуры от террористических и диверсионных атак), а, с другой стороны, можно выделить и схожие черты (применение оружия и специальной техники, бои в особых условиях и др.).

Указанные особенности специальных действий и обуславливают выбор математического аппарата для их моделирования: набор математических методов (методы теории вероятностей, теории игр, оптимизации и т. д.) при моделировании боевых и специальных действий в основном один и тот же, тогда как конкретные модели позволяют учесть специфику специальных действий.

### ***7.1.1. Классификация моделей специальных действий***

Выделение специальных действий в отдельную форму применения вооруженных сил, анализ нормативных актов и литературы по описанию партизанских / антипартизанских, разведывательно-диверсионных, контртеррористических и других действий дают основания рассматривать модели специальных действий на примере моделей борьбы с терроризмом и при необходимости показывать специфику других специальных действий.

В работе «Mathematical Methods in Counterterrorism» [524] перечислены математические методы в задачах борьбы с терроризмом (основания для классификации – математические методы и функции моделирования):

- методы сетевого анализа (Network Analysis), выявление структуры террористических ячеек;
- методы прогнозирования (Forecasting), динамический анализ сетей, выявление закрытых групп в социальных сетях по неполным данным, обнаружение и отслеживание террористической активности;

– методы построения сетей (Communication/Interpretation) террористических групп, отвечающие требованиям доступности и конспирации, обеспечения влияния этих групп на население;

– методы математического анализа и управления поведением людей и групп (Behavior), анализ государственно-террористических коалиций, анализ поведения террористических групп с целью повышения эффективности борьбы с ними;

– теоретико-игровые методы (Game Theory), выявление условий и превентивных действий, при которых террористические группировки (включая государственные) отказываются от приобретения оружия массового поражения, нахождение оптимальных решений по защите объектов, оценка влияния мер по борьбе с террором на отношение населения к терроризму, анализ террористических структур методами иерархических игр и др.

В указанной работе также анализируются материалы научных конференций по математическим методам борьбы с терроризмом, ставится вопрос о формировании соответствующей теории, объединении усилий представителей различных научных дисциплин (математиков, политологов, психологов, специалистов по информатике и др.).

Классификация моделей специальных действий возможна по следующим основаниям (см. [382; 579]).

1. Виды специальных действий: модели борьбы с террористами, диверсантами, пиратами, бандитами, модели партизанских (антипартизанских), разведывательно-диверсионных и др. действий.

2. По среде: модели специальных действий на суше, море, в воздухе, в киберпространстве.

3. По этапам циклов деятельности: модели планирования (прогнозирования), предотвращения, реагирования, восстановления и др.

4. По методам моделирования (см. раздел 1.3.2 и [253]).

В работе [439] выполнен обзор (библиография включает свыше 300 статей и книг) и анализ комплекса математических моделей, посвященных выявлению причин и условий радикализации отдельных социальных групп в интересах предупреждения терроризма и заблаговременной подготовки к борьбе с ним. Содержание работы и полученные исследователями (специалистами в области физики, социологии, математики, информатики) результаты свидетельствуют о плодотворности идей и подходов, высказанных основателями кибернетики (совместные решения проблем специалистами разных отраслей знаний и перенос результатов из одной предметной области в другую<sup>1</sup>).

---

<sup>1</sup> В интересах решения задач по обеспечению безопасности были разработаны игры безопасности (security games), нашедшие практическое применение в деятельности

Процессы радикализации исследуются с использованием моделей демографической динамики, основанных на методах статистической термодинамики: группам социальной среды (основание классификации – степень восприимчивости лиц к идеям терроризма и экстремизма) ставятся в соответствие дифференциальные уравнения<sup>1</sup>.

Вторая группа моделей радикализации, объясняющие групповую поляризацию мнений и взглядов, – это расширения моделей перколяции<sup>2</sup> и модели Изинга, описывающей намагничивание материалов. Распространение мнений рассматривается как на безмасштабных сетях<sup>3</sup> (scale-free network), так и на случайных сетях и сетях малого мира<sup>4</sup>. Модели верифицированы на реальных данных. В частности, рассмотрен пример вербовки террористов на Северном Кавказе в социальной сети «ВКонтакте». За 8 месяцев 2015 г. было выявлено около 196 самоорганизующихся онлайн-сообществ, поддерживающих идеологию ИГИЛ (запрещена в России), которые привлекли к своим идеям свыше ста тысяч подписчиков [439].

Актуальной проблемой является выявление «оптимальных» (с точки зрения руководителей террористических организаций) организационных структур, обеспечивающих эффективность террористических атак и, вместе с тем, конспирацию террористических групп и безопасность от внедрения нежелательных элементов. На рис. 7.1.1 показаны оптимальные террористические структуры<sup>5</sup> (рисунок взят из [439]).

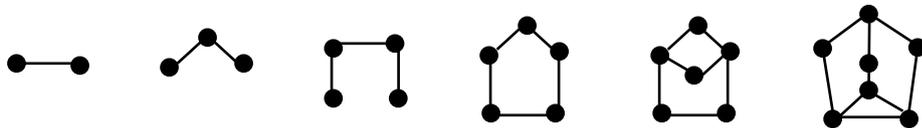


Рис. 7.1.1. Оптимальные террористические структуры

Знание оптимальных террористических структур полезно при организации мер по борьбе с терроризмом.

---

специальных служб (защита от терроризма, охрана критически важной инфраструктуры и т. д.). В последние годы полученные теоретико-игровые решения стали использоваться для защиты дикой природы, охраны водных биологических ресурсов, обнаружения угроз в больших компьютерных сетях [496].

<sup>1</sup> Более полное и комплексное исследование моделей динамики распространения мнений и поведения можно найти в работах [122; 63].

<sup>2</sup> Введению в теорию перколяции посвящены работы [438; 333].

<sup>3</sup> Безмасштабная сеть – это граф, в котором степени вершин (количество исходящих из вершин ребер) распределены по степенному закону.

<sup>4</sup> Описание характеристик названных сетей можно найти в работе [140].

<sup>5</sup> Оптимальный граф – это граф, максимизирующий произведение меры коммуникации и меры секретности [439].

Третья группа моделей – теоретико-игровые модели. С 2000-х годов в задачах анализа терроризма применяются дифференциальные игры (differential terrorism games), которые используются для исследования динамики рациональных действий власти и террористических групп, оценки риска террористических атак и выработки стратегии их предотвращения [522; 571; 580].

Одна сторона (правоохранительные структуры или террористические организации) наблюдает за действиями другой и соответствующим образом корректирует свою стратегию. Например, террористы наблюдают, как правительство распределяет свои ресурсы по объектам, прежде чем решить, следует ли атаковать и какой из объектов выбрать для атаки. Соответственно, власть, распределяет ресурсы по объектам, а после террористической атаки корректирует свои ответные меры. В этом случае для поиска оптимальных решений используется равновесие Штакельберга.

Четвертая группа моделей – описание террористических событий как самоорганизующихся процессов. Хорошо известно, что террористическая деятельность не является полностью случайной, предыдущая успешная атака может временно увеличить вероятность повторной атаки в географической близости от нее. С математической точки зрения феномен прошлых событий, выступающий как катализатор будущих событий может быть описан как процесс Хоукса<sup>1</sup>.

Каноническая форма дискретного процесса Хоукса:

$$\lambda(t) = \mu(t) + \sum_{it_i < t} v(t - t_i), \quad (7.1.1)$$

где:  $\lambda(t)$  – интенсивность террористических атак в момент времени  $t$ ,  $\mu(t)$  – интенсивность внешних событий (социально-политический контекст),  $t_i$  – время наступления  $i$ -го события,  $0 = t_0 < t_1 < t_2 < \dots$ ,  $v(s)$  – функция реагирования на атаки, отражает увеличение выделяемых ресурсов с ростом интенсивности атак в предыдущие моменты времени. Как правило,  $v(s)$  является убывающей функцией (чаще всего – экспонента):

$$v(s) = k_0 \omega e^{-\omega s}, \quad (7.1.2)$$

где:  $\omega > 0$  – параметр, характеризующий как быстро эффект самоорганизации пропадает со временем,  $k_0$  учитывающий увеличение риска следующей атаки

---

<sup>1</sup> Процессы Хоукса – это расширение процессов Пуассона, применяются для прогнозирования эпидемий, землетрясений, биржевых кризисов, экономических рисков, рисков политических беспорядков и насилия, повстанческой и террористической деятельности. Описание процессов Хоукса и их приложений в экономике можно найти в работе [142].

после предыдущей. Для заданного временного интервала параметры  $\omega$ ,  $k_0$  и  $\mu_0 = \mu(t)$  вычисляются методом максимального правдоподобия.

Модель (7.1.1) - (7.1.2) была проверена на статистических данных по терактам в Юго-Восточной Азии (Филиппины, Индонезия и Таиланд), в Сирии и Северной Ирландии. Значительные различия в характере и интенсивности терактов в этих странах объяснялись за счет различий в социально-политическом контексте. Выявляемые с помощью моделей неравномерности в террористических актах могут быть полезны при организации контртеррористической деятельности.

В табл. 7.1.1 даны краткие характеристики некоторых работ в области моделирования специальных действий.

Таблица 7.1.1. Некоторые работы в области моделирования специальных действий

| Работы   | Их краткая характеристика  |
|--|--|
| «Geographic profiling: Target Patterns of Serial Murderers», 1995 [549]      | Модель, позволяющая определить вероятность места проживания (базирования) преступника с учетом ранее совершенных им преступлений (координаты) и других характеристик   |
| «Advanced Techniques for Modeling Terrorism Risk», 2002 [520]                | С использованием равновесия Нэша решается задача оптимального распределения ресурсов между объектами защиты  |
| «A dynamical model of terrorism», 2006 [571]                                 | Население состоит из трех групп: террористы и лица, восприимчивые и не восприимчивые к пропаганде терроризма (экстремизма). Для анализа динамики используются обыкновенные дифференциальные уравнения и уравнения в частных производных  |
| «Mathematical terrorism», 2010 [465]   | 1) модель динамики террористической группы (с выделением в ней лидеров и рядовых исполнителей) с использованием системы двух дифференциальных уравнений, учитывающих меры по борьбе с террористами;<br>2) модель разрушения элементов (террористической) сети с минимальными затратами;<br>3) модель проектирования сети с обеспечением каскадной устойчивости для выявления уязвимых мест в сетях террористических и преступных группировок |
| «Adversarial Geospatial Abduction Problems», 2012 [556]                      | Теоретико-игровая модель геопространственной абдукции, применяется для поиска мест базирования повстанцев (партизан, террористов) по результатам диверсий или ожидаемым объектам атаки   |
| «Modeling human conflict and terrorism across geographic scales», 2015 [488] | Применение методов статистической физики для анализа социальных конфликтов   |

| Работы  | Их краткая характеристика   |
|---|---|
| «An Agent Based Approach for Understanding Complex Terrorism Behaviors», 2016 [570] | Применение агентного моделирования для анализа террористических атак; верификация модели по данным статистики об атаках террористов-смертников в Ираке  |
| «Trends and Applications in Stackelberg Security Games», 2018 [496]                 | Обзор исследований в области игр безопасности Штакельберга  |
| «Lanchester Models for Irregular Warfare», 2020 [505]                               | Расширение уравнений Осипова-Ланчестера для анализа боевых действий с нерегулярными формированиями  |
| «Mathematical model of terrorism: case study of Boko Haram», 2022 [560]             | Детерминированная модель (система дифференциальных уравнений), учитывающая захваты заложников террористами и их требования по освобождению арестованных террористов. Модель верифицирована на реальных данных |
| «A risk-based game theory model of navy and pirate behaviors», 2022 [456]           | Применение теоретико-игрового подхода в задачах борьбы с морским терроризмом и пиратством   |

Исходя из краткого обзора моделей специальных действий можно сделать вывод, что достаточно востребованными являются следующие задачи:

- применение методов криминологии (включая географическое профилирование) для выявления мест дислокации повстанцев (террористов, серийных преступников);
- анализ и управление сетями, сетевые игры;
- анализ и прогнозирование динамики специальных действий.

Далее рассмотрим подходы к решению перечисленных задач.

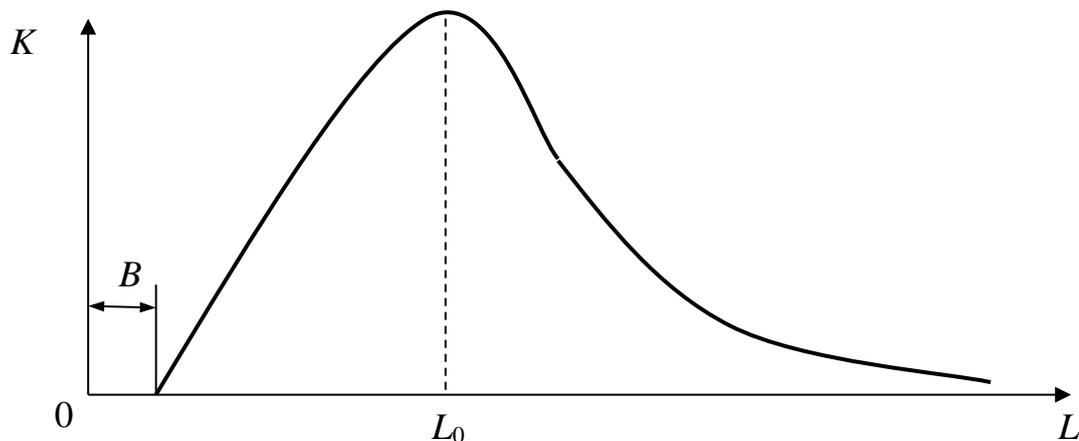
### ***7.1.2. Задачи географического профилирования преступности***

Многие исследователи в области криминологии руководствуются теорией рационального выбора и теорией рутинной деятельности<sup>1</sup>. Названные теории являются основой для применения математического аппарата и разработки криминологических моделей. Факторы окружающей среды (пространственные, временные и пространственно-временные) оказывают существенное влияние на преступность.

<sup>1</sup> Основной тезис теории рутинной деятельности: «структурные изменения в рутинной деятельности могут влиять на уровень преступности посредством схождения в одной точке места и времени трех минимальных элементов преступного посягательства прямого контакта: 1) преступников с мотивом, 2) подходящих целей, 3) отсутствия дееспособных защитников от правонарушения» [442, с. 589].

Географическое профилирование основано на следующих предположениях: 1) преступники (группы) выбирают места проживания (базирования) для совершения серии преступлений (диверсий, террористических актов); 2) они стремятся минимизировать расстояние от места дислокации до цели чтобы не быть задержанным с орудиями преступления; 3) существуют буферная зона (область вокруг места дислокации), где они не совершают преступлений, и типовые маршруты.

На рис. 7.1.2 показана экспериментальная зависимость количества преступлений от расстояния между местом жительства (базы) преступника и местом преступления.



Источник: Criminal Profiling. International Theory, Research, and Practice.  
 Edited by R. Kocsis. – Humana Press, 2007. – P. 350.

*Рис. 7.1.2. Зависимость количества  $K$  преступлений от расстояния  $L$  между местом жительства преступника и местом преступления*

На практике для определения вероятных мест базирования правонарушителей используются, как правило, следующие методы:

1. Метод окружности. Через две точки – координаты самых удаленных мест преступлений, проводится окружность (эти точки лежат на границах диаметра окружности). Центр окружности принимается за место жительства преступника.

2. Метод «центра масс». Вычисляется среднее арифметическое координат мест преступлений.

3. Метод с использованием формулы К. Россмо. Территория с использованием электронной карты покрывается сеткой с квадратными ячейками; вероятность  $P_{ij}$  того, что преступник находится в ячейке ( $i$  – номер строки,  $j$  – номер столбца) может быть вычислена по формуле [549]:

$$P_{ij} = k \sum_{c=1}^T \left[ \frac{\varphi}{(|x_i - x_c| + |y_i - y_c|)^f} + \frac{(1 - \varphi) B^{g-f}}{(2B - |x_i - x_c| - |y_i - y_c|)^g} \right], \quad (7.1.3)$$

где:  $f = g = 1, 2$  – параметры;  $k$  – параметр, обеспечивающий значение вероятности на отрезке  $[0, 1]$ ;  $T$  – количество преступлений;  $0 \leq \varphi \leq 1$  – весовой коэффициент;  $B$  – радиус буферной зоны.

П. Шакарян и его коллеги в работе [556] предложили теоретико-игровой подход к проблеме географического профилирования.

Тактика применения повстанцами самодельных взрывных устройств (СВУ) заключается в следующем. Нападения с использованием СВУ осуществляются мелкими группами. В группе есть специалист по изготовлению СВУ, специалист по логистике и переносчик СВУ. Так же выделяется лицо, ответственное за установку и подрыв СВУ. Группы пользуются услугами информаторов и пособников из числа местного населения. Члены диверсионных групп не хранят СВУ дома. Для хранения используются склады (тайники, укрытия), к которым предъявляются определенные требования. Расстояние между складом и местом диверсии не может быть слишком малым, что чревато его раскрытием и уничтожением. С другой стороны, это расстояние не может быть слишком большим, поскольку велик риск быть обнаруженным на маршруте доставки. Обычно перевозка СВУ выполняется ночью, причем время доставки СВУ к месту диверсии не превышает одного-двух часов.

Приведем постановку теоретико-игровой задачи. Имеются два игрока: агент (военная или правоохранительная структура) и противник (диверсионная или террористическая группа). Агент пытается найти «объяснения» для набора наблюдений о совершенных противником актах, противник выбирает стратегию, чтобы эти объяснения скрыть. Стратегия противника (обозначается  $A$ ) есть набор точек, в которых он размещает тайник (склад), стратегия (обозначается  $B$ ) агента – набор точек, в которых, по его мнению, хранится тайник с СВУ.

Заданы целочисленные координаты  $M, N \in \mathbb{N}$  и пространство  $S = \{1, \dots, M\} \times \{1, \dots, N\}$ . Это представление пространства как набора целочисленных координат распространено в большинстве ГИС.

Целевая функция агента  $f(A, B): 2^S \times 2^S \rightarrow [0, 1]$  удовлетворяет аксиомам:

1) Если  $A = B$ , то  $f(A, B) = 1$ ;

2) Для любых  $B, B'$  выполняется:

$$f(A, B \cup B') \leq f(A, B) + f(A, B') - f(A, B \cap B').$$

Целевая функция противника равна  $-f(A, B)$ , т. е. игра антагонистическая. Конкретный вид целевой функции можно определить по-разному. Решение игры в области смешанных стратегий представлено в [556]. Созданная на

основе математической модели компьютерная программа SKARE прошла апробирование в Ираке для борьбы с повстанцами и террористами.

В программу SKARE введено ограничение – определенные нападения и тайники приписываются к одной диверсионной группе (или семейству групп). Для тестирования программы были взяты данные о диверсионных актах, совершенных в Багдаде (27x25 км) и его пригороде Садр-Сити (7x7 км) (табл. 7.1.2).

Таблица 7.1.2. Данные о диверсионных актах и их параметрах

| Область   | Число диверсионных актов | Минимальное расстояние $\alpha$ , км | Максимальное расстояние $\beta$ , км |
|-----------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Багдад    | 73                       | 0,6                                  | 1,98                                 |
| Садр-Сити | 40                       | 0                                    | 1,06                                 |

Точность определения координат тайника с СВУ по Багдаду составила 0,72 км. Низкая точность может быть объяснена значительной неоднородностью кварталов Багдада. Для более однородного по условиям совершения терактов пригорода точность составила 0,35 км. Программа SKARE приспособлена для выявления тайников в городских кварталах, но мало пригодна для решения той же задачи в масштабе провинции Афганистана.

П. Шакарян и его коллеги внесли доработки в теоретико-игровую модель, позволившую учитывать особенности рельефа двух провинций (площадь 580 на 430 км), социально-культурные аспекты (разные племена, живущие в провинциях), возможности и режим полетов бесплотных летательных аппаратов и других средств войсковой разведки. Для тестирования доработанной программы SKARE2 в нее были введены данные по 203 террористическим актам (103 случая использовались для определения границ доверительных интервалов  $[\alpha, \beta]$ , см. табл. 7.1.2, и 100 случаев для проверки точности прогнозирования мест СВУ). Программа SKARE2 позволяет определять местонахождение террористов и СВУ с точностью до 100 кв. км (в среднем это 4,6 села).

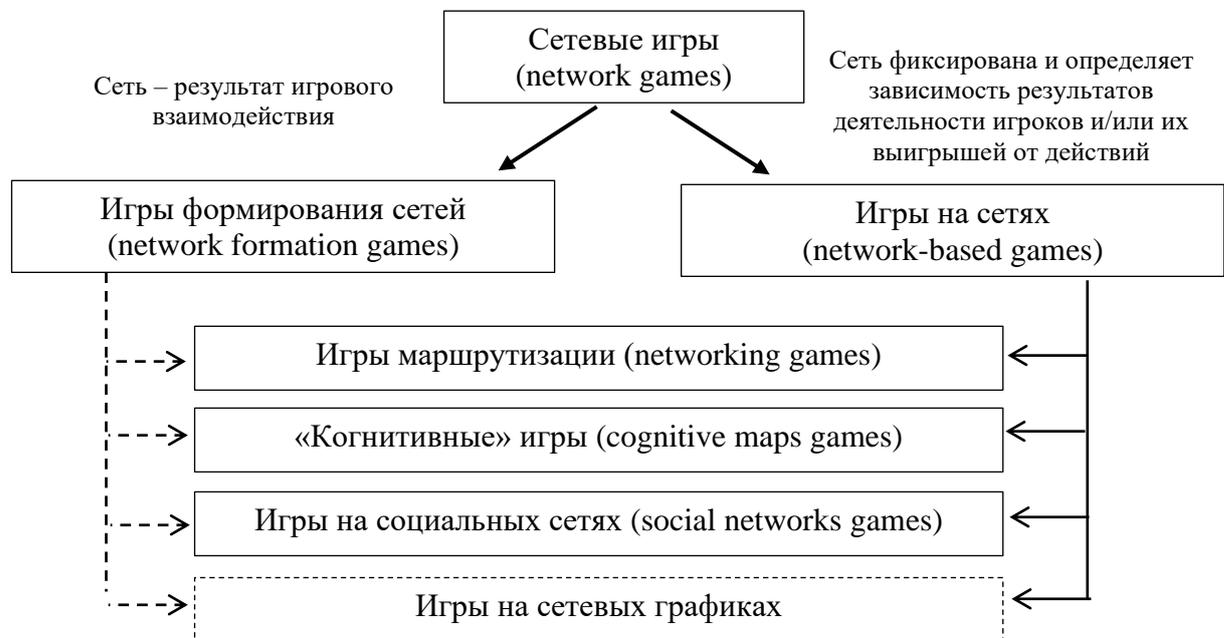
Отметим, что метод географического профилирования полезен, когда преступная группа совершает серию преступлений, базируясь в одном месте (районе). С учетом данного ограничения его можно рекомендовать к использованию в деятельности правоохранительных и специальных структур.

Наряду с географическим профилированием в криминологии используются и другие количественные методы анализа и прогноза преступности в целях борьбы с ней и ее предупреждения.

Поскольку одной из целей диверсантов, террористов и повстанцев является дестабилизация общества и насильственная смена власти, важной научной проблемой криминологии является разработка методов и индикаторов оценки устойчивости общества и его антихрупкости. Одним из методов прогнозирования конфликтов является подход, основанный на выявлении некоторых индикаторов – предикаторов надвигающихся событий. В ряде работ в качестве индикатора напряженности предлагается рассматривать сумму умышленных убийств и самоубийств. Применение данного индикатора основано на выявленной статистической зависимости между аномальным ростом количества убийств и самоубийств и социальными конфликтами (революциями, гражданскими войнами, массовыми протестами) [40; 161].

### 7.1.3. Сетевые игры

С конца 1970-х годов развивается *теория сетевых игр*, изучающая формирование сетевых структур – устойчивых связей между игроками в условиях несовпадения интересов и/или различной информированности последних (см. [123; 251]). Наряду с термином «сетевые игры» (network games), все чаще встречается термин «игры формирования сетей» (network formation games) (рис. 7.1.3).



Источник: Новиков Д.А. Игры и сети // Математическая теория игр и ее приложения. – 2010. – Том 2, Вып. 1. – С. 109.

Рис. 7.1.3. Сетевые игры

Сетевые игры рассматриваются как включающие в себя игры формирования сетей и игры на сетях, причем в последних «сеть» фиксирована. Среди игр на сетях, в свою очередь, выделяются: игры маршрутизации, «когнитивные» игры, игры на социальных сетях и игры на сетевых графиках [251].

По Д.А. Новикову на качественном уровне различие между играми формирования сетей и играми на сетях состоит в том, что в первых предметом выбора игроков являются переменные, относящиеся к парному взаимодействию между игроками, а в играх на сетях – переменные, описывающие вершины сети (значения факторов в играх на когнитивных картах, мнения агентов в играх на социальных сетях и т. д.). В будущем эти модели, вероятно, объединятся (см. пунктирные стрелки на рис. 7.1.3). Объединение моделей приведет к двухэтапной игре, на первом этапе которой игроки формируют сеть, а на втором этапе используют сформированную сеть для передачи информации, ресурсов и т. д. в соответствии с концепцией игр на сетях.

Напомним, что *графом* (ориентированным) называется совокупность  $\langle N, E \rangle$  множества вершин  $N$  и множества дуг  $E \subset N \times N$ . На рис. 7.1.4 показан пример графа.

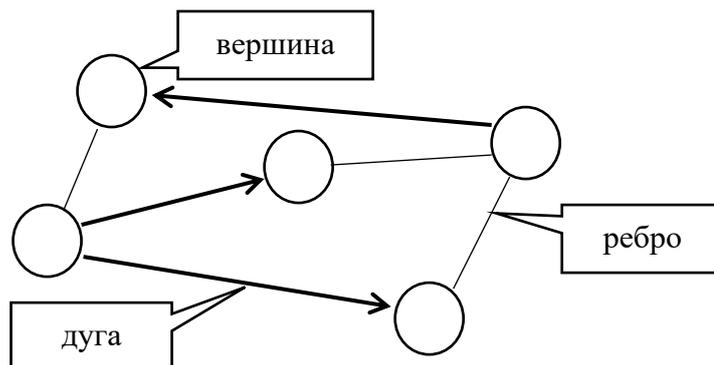


Рис. 7.1.4. Пример графа

Графы, вершинами которых являются игроки, обычно называются *сетями* или *структурами связей*, а дуги такого графа – *связями*.

Исследование игр на сетях включает следующие общие этапы [251]:

- 1) описание сети и исследование ее динамики;
- 2) описание множества игроков, их предпочтений, информированности, множеств допустимых стратегий и контролируемых параметров;
- 3) сведение игры на сети к той или иной известной теоретико-игровой модели (игре в развернутой форме, игре в нормальной форме, кооперативной игре и т. д.).

На этом «сетевая» специфика заканчивается и начинается этап классического теоретико-игрового анализа, результаты которого, конечно, должны быть затем проинтерпретированы в «сетевых» терминах.

Для примера рассмотрим постановку задачи исследования оптимальной сети террористической (повстанческой) группы. Создаваемые террористами сети должны обладать, как минимум, двумя свойствами: 1) каскадная устойчивость сети (разрушение одного ее элемента не должно приводить к разрушению всей сети или значительной ее части), 2) эффективность сети (обмен информацией между членами группы и совместное решение задач).

Если обозначить через  $\Theta(N)$  множество всех графов с множеством вершин  $N$ , то заинтересованность  $i$ -го игрока (руководителя террористической организации или правоохранительных структур), в той или иной структуре связей можно описать функцией выигрыша  $f_i: \Theta(N) \rightarrow \mathcal{R}$ ,  $i = 1, 2$ , определяющей выигрыш игрока при реализации различных структур. Поскольку цели игроков обычно антагонистичны, то достаточно рассмотреть только функцию  $f_1$  руководителя террористической организации.

Целевой функцией 1-го игрока может быть следующая функция:

$$f_1(G) = \max_{G \in \Theta} (\alpha R(G) + (1 - \alpha)W(G)), \quad (7.1.4)$$

где:  $0 < \alpha < 1$  – параметр,  $R(G)$  – функция устойчивости сети,  $W(G)$  – функция эффективности сети. Конкретный вид функций  $R(G)$  и  $W(G)$  представлен в работе [465]. Отметим, что значения указанных функций зависят от действий обоих игроков.

#### ***7.1.4. Модели динамики специальных действий***

Одним из первых и наиболее важных классов моделей боевых действий являются уравнения Осипова-Ланчестера, которые легко расширяются для моделирования борьбы с повстанцами, партизанами и террористическими группами [253; 505].

В классической модели Осипова-Ланчестера (см. также раздел 4.2 выше) обе стороны применяют одинаковую тактику и технику ведения огня, бои симметричны. Асимметричные бои происходят, когда стороны применяют разную тактику (например, регулярные силы ведут борьбу с партизанами или повстанцами [446]). С одной стороны, партизаны, хорошо укрывшиеся в засаде или смешанные с мирным населением, ведут прицельный огонь по регулярным войскам, которые полностью открыты для партизан. С другой стороны, регулярные силы «стреляют врасплох» и поэтому могут вести огонь по партизанам только по площади. Если обозначить  $x(t)$  – численность регулярных войск в момент времени  $t$ , а  $y(t)$  – численность партизан, то получим следующие уравнения:

$$\frac{dx(t)}{dt} = -a_y y(t), \quad \frac{dy(t)}{dt} = -a_x x(t) \frac{y(t)}{y_0}, \quad (7.1.5)$$

где  $a_x > 0$  и  $a_y > 0$  – параметры поражающей скорострельности (мощи) боевых единиц первой и второй стороны,  $y_0 = y(0)$ .

Из решения системы (7.1.5)

$$\frac{a_x}{2}(x_0^2 - x^2(t)) = a_y(y_0^2 - y_0 y(t)) \quad (7.1.6)$$

находим условие равенства сил:

$$\frac{a_y y_0^2}{a_x x_0^2} = \frac{1}{2} \quad \text{или} \quad \sqrt{2} y_0 = x_0 \sqrt{\frac{a_x}{a_y}}. \quad (7.1.7)$$

То есть, при прочих равных условиях, для достижения паритета численность регулярных войск должна быть в  $\sqrt{2} \approx 1,4$  раза выше численности партизан (сравните с выражением (4.2.3)).

Другой вид асимметрии заключается в том, что регулярные войска имеют разнородные силы и средства, а повстанцы (вторая сторона) однородны. Тогда получим уравнения:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = -\beta_i(t) a_y y(t), \quad i = 1, \dots, n; \quad \frac{dy(t)}{dt} = -\sum_{i=1}^n a_{xi} x_i(t), \quad \sum_{i=1}^n \beta_i(t) = 1, \quad (7.1.8)$$

где  $a_{xi}$  – параметр поражающей мощи единиц  $i$ -го типа первой стороны,  $x_i(t)$  – численность единиц  $i$ -го типа первой стороны,  $\beta_i(t)$  – доля сил повстанцев, выделяемых в момент времени  $t$  для поражения единиц  $i$ -го типа противника.

Возможны и другие постановки задач динамики специальных действий:

– учет в моделях активности мирного населения, которое может поддерживать как регулярные войска, так и повстанцев;

– распределение регулярных войск по районам (объектам) для защиты мирного населения от диверсионных и террористических атак как динамически (в зависимости от информации), так и на постоянной основе (например, когда районы защиты территориально разнесены);

– на территории одного государства ведут боевые действия регулярные силы нескольких государств;

– и т. д. и т. п.

Таким образом, краткий обзор работ в области моделирования специальных действий показывает: во-первых, возросший в последние годы интерес исследователей к задачам борьбы с терроризмом, диверсиями, повстанцами, партизанами, бандитами и т. д.; во-вторых, эффективность кибернетического подхода, когда результаты исследований в одной предметной области (боевые действия, распространение эпидемий, статистическая физика и т. д.) перено-

сятся в другую предметную область с учетом специфики последней; в-третьих, значимость комплексных исследований с привлечением специалистов предметной области, математиков, социологов, политологов, физиков и др.

## **7.2. Игра «атакующий-защитник» в задачах обеспечения безопасности и борьбы с терроризмом**

Центральной проблемой в задачах защиты населения и инфраструктуры от террористических актов и диверсий является нахождение оптимального распределения ресурсов по объектам, задачам, времени, технологиям и т. д. Эта проблема обычно решается методами теории игр или комплексными исследованиями, где теоретико-игровые задачи описывают стратегическое поведение участников (правительства, вооруженных сил, террористических и диверсионных групп), см. приложение 2.

Настоящий раздел посвящен описанию игры «атакующий-защитник»<sup>1</sup>, следуя обзорным работам [481; 496].

### **7.2.1. Классификация постановок задач в игре «атакующий-защитник»**

Исторически первые постановки и решения задач распределения ресурсов между объектами возникли в военной области (игра полковника Блотто, задача «нападение-защита» Ю.Б. Гермейера и др.).

Игра «атакующий-защитник» применительно к задачам обеспечения безопасности и борьбы с терроризмом стала систематически исследоваться с начала 2000-х годов и к настоящему времени известны сотни работ с различными постановками задач. Известные работы классифицируются по следующим основаниям [481].

**1. Последовательность ходов.** В зависимости от продолжительности циклов деятельности и информированности сторон выделяются игры с одновременным выбором ходов или с последовательным (иерархические игры).

---

<sup>1</sup> В игре «атакующий-защитник», как правило, ресурсы полагаются заданными. Решается задача их оптимального распределения. Вопрос об оптимальном размере ресурсов, выделяемых для защиты объектов, обычно решается в задачах более высокого уровня. Другое название игры «атакующий-защитник» – это игра безопасности (security game) [503].

В иерархических играх обычно полагается, что защитник (правительственные силы) ходит первым, а атакующий (террористическая или диверсионная группа), после изучения действий защитника, ходит вторым. Если стороны выбирают свою стратегию, не зная действий противника, то полагается, что имеется игра с одновременным выбором ходов.

Игры с одновременным выбором ходов решаются с использованием равновесия Нэша, а с последовательным<sup>1</sup> – равновесия Штакельберга. Другие факторы (информационная структура игры – см. [260]) также влияют на концепцию решения: возникают постановки задач в форме байесовских, сигнальных и рефлексивных игр.

**2. Количество игроков.** В абсолютном большинстве работ рассматривается два стратегических игрока – защитник и атакующий. В работе [448] рассмотрен случай, когда одни и те же объекты защищаются двумя децентрализованными защитниками. Авторы показали, что ожидаемые потери одного централизованного защитника меньше потерь двух децентрализованных защитников.

В ряде работ рассматриваются ситуации, когда имеется один защитник и  $N$  атакующих. Если среди разнородной группы атакующих есть один особенно сильный, то остальные атакующие могут отказаться от действий. Поэтому защитнику следует направлять свои усилия, в первую очередь, против одного сильнейшего.

**3. Целевые функции игроков.** В качестве целевой функции защитника используются следующие:

- максимизация ожидаемой полезности как разности между ожидаемой выгодой (предотвращенным ущербом) и ожидаемым убытком;
- максимизация ценности неповрежденных объектов или минимизация вероятности успешной атаки;
- максимизация вероятности обнаружения атакующих и др.

В антагонистических играх цель атакующего заключается в минимизации целевой функции защитника.

**4. Временной горизонт игры.** Большинство игр являются однокходовыми. Они относительно просты и практичны. Например, когда силы безопасности рассматривают возможность развертывания новых технологий, их интересует, как могут отреагировать противники. Аналогично, при изучении различных политик досмотра контейнеров в портах службы безопасности хотят понять, как эти политики повлияют на решения контрабандистов.

---

<sup>1</sup> В большинстве работ рассматриваются игры с последовательным выбором ходов. Исключения составляют игры патрулирования (patrolling games).

Конечно, эти примеры могут быть расширены до многошаговой ситуации, где игра ведется непрерывно на фиксированном или бесконечном горизонте времени. Например, если интересуются вопросом, какие технологии следует приобретать со временем, то следует использовать многошаговую игру.

В работе [590] рассматривается игра с конечным числом шагов, в которой защитник на каждом шаге выбирает стратегию защиты и стратегию раскрытия информации, а атакующий с учетом имеющегося знания выбирает свою стратегию. Выяснилось, что в определенных сценариях защитник за счет скрытия и обмана может получить преимущество в игре при прочих равных условиях.

О. Барон и др. [417] исследовали многошаговую игру, где на каждом шаге защитник решает, отвечать ли ему на атаку или не отвечать. На реальных данных из нескольких источников авторы получили согласующиеся с практикой решения.

В статье [416] моделируется реалистичный сценарий, в котором защитник решает, делать ли публичное предупреждение о готовящейся атаке. Это предупреждение может повлиять на время террористической атаки, сдвинув ее на более поздний период, а службам безопасности лучше подготовиться к защите или подавить угрозу.

**5. Степень рациональности игроков.** Обычно полагается, что игроки обладают совершенной рациональностью, т. е. четко определяют свои цели, ранжируют их в порядке значимости и обладают абсолютными вычислительными способностями. Вместе с тем, имеется ряд работ, в которых игроки считаются ограниченно рациональными и выбирают стратегии, близкие к оптимальным. Описание типов ограниченной рациональности и методов решения задач с учетом ограниченной рациональности игроков можно найти в работе [258]. В большинстве задач с ограниченной рациональностью игроков находится равновесие дискретного отклика (quantal response equilibrium). В работе [587], используя исторические данные, авторы показали, что равновесие дискретного отклика приводит к более близким к реальности решениям по распределению ресурсов, чем решения с использованием классических подходов и предположения о совершенной рациональности игроков.

**6. Отношение игроков к риску.** В большинстве теоретико-игровых задач полагается, что игроки нейтральны к риску. Лишь в небольшом числе работ исследуются целевые функции для игроков, склонных к риску, или стремящимся его избежать. В работе [589] рассматривается игра по защите объектов от стихийных бедствий и террористических атак с одновременным и последовательным выбором стратегий и аддитивными целевыми функциями,

учитывающими ресурсы сторон и возможный ущерб объектам. Рассмотрены варианты, когда игроки нейтральны к риску, склонны к нему или стремятся его избегать.

В общем случае, учет отношения игроков к риску приводит к нелинейным целевым функциям и трудностям при нахождении оптимальных решений (зачастую их можно вычислить только численными методами).

**7. Степень информированности игроков.** Информационная структура игры существенно влияет на действия игроков и, как следствие, на результаты этих действий. Обычно полагается, что игроки обладают *общим знанием* (см. [259]) о существенных параметрах игры (целевых функциях, возможных стратегиях и т. д.). В некоторых работах требование общего знания ослаблялось и вводились следующие предположения:

- только защитник знает уязвимость объектов;
- защитник не знает предпочтений атакующего (его тип и ресурсы);
- атакующий не знает защитных мер на объектах или результата атаки и др.

В результате возникает байесовская игра<sup>1</sup>, которая более сложна и трудоемка в решении.

В игре «защитник-атакующий» (или в игре обеспечения безопасности) оптимальные стратегии находятся с использованием равновесия Нэша или Штакельберга. Обсуждению взаимосвязи указанных концепций равновесия посвящена работа [503]. Обычно полагается, что атакующий наблюдает за действиями защитника по охране объектов и, исходя из полученной информации, выбирает объект для атаки. В этом случае имеется иерархическая игра и оптимальная стратегия защитника основана на равновесии Штакельберга. Однако, зачастую атакующему получить информацию о действиях защитника трудно. В этом случае защитнику следует использовать равновесие Нэша (игра с одновременным выбором стратегий).

D. Korzhuk et al. доказали, что оптимальная по Штакельбергу стратегия защитника вместе с тем является оптимальной и по Нэшу при выполнении следующих условий: защитник имеет однородные ресурсы, атакующий выбирает один объект для атаки [503].

---

<sup>1</sup> Дж. Харсаньи так определил байесовскую игру. В дополнение к фактическим участникам игры появляется виртуальный игрок «природа». Природа наделяет каждого из фактических участников случайной переменной, значение которой называется его типом. Распределение (плотность или функция вероятности) типов для каждого из игроков является общим знанием. В начале игры природа «выбирает» типы игроков. Тип, в частности, определяет функцию выигрыша участника [470].

Поскольку для описания проблем безопасности и специальных действий наиболее часто применяются иерархические игры, то далее рассмотрим одну из разновидностей этих игр.

### 7.2.2. Игра безопасности Штакельберга

Игрой безопасности Штакельберга (Stackelberg security game) называется игра, возникающая в задачах обеспечения безопасности, в которой первая сторона (лидер, обычно это защитник) стремится максимизировать свою полезность, зная, что вторая сторона (агент, последователь, атакующий), зная действия первой стороны, оптимизирует собственную полезность [436].

Сначала формализуем *игру Штакельберга* (General Stackelberg game). Обозначим  $I$  – множество чистых стратегий лидера (первого игрока),  $J$  – множество чистых стратегий агентов (игроков, делающих ход после лидера),  $\pi^k \in [0, 1]$  – вероятность столкновения лидера с  $k$ -м агентом,  $k \in K$ , где  $K$  – множество агентов. Введем  $n$ -мерный симплекс:

$$S^n = \left\{ a \in [0, 1]^n : \sum_{h=1}^n a_h = 1 \right\}.$$

Смешанная стратегия лидера – это вектор  $x \in S^{|I|}$ , такой, что для любого  $i \in I$ ,  $x_i$  – вероятность выбора стратегии  $i$ . Аналогично, смешанная стратегия  $k$ -го агента – это вектор  $q^k \in S^{|J|}$ , такой, что  $q_j^k$  – это вероятность, с которой  $k$ -й агент выбирает стратегию  $j \in J$ . Заданы матрицы платежей (выигрышей) лидера и агентов. Эти матрицы обозначаются  $(R^k, C^k)$ , где  $R^k \in \mathbb{R}^{|I| \times |J|}$  – матрица лидера,  $C^k \in \mathbb{R}^{|I| \times |J|}$  – матрица  $k$ -го агента. Ожидаемые выигрыши лидера и агентов:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \pi^k R_{ij}^k x_i q_j^k, \quad (7.2.1)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij}^k x_i q_j^k, \quad \forall k \in K. \quad (7.2.2)$$

Решение игры Штакельберга формулируется как задача двухуровневого программирования (bilevel programming). Задача первого уровня соответствует задаче принятия решения лидером, а вложенная задача (задача второго уровня) решается для агентов [436]:

$$\max_{x, q} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \pi^k R_{ij}^k x_i q_j^k, \quad (7.2.3)$$

$$x \in S^{|I|}, \quad (7.2.4)$$

$$q^k \in \arg \max_{r^k} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij}^k x_i q_j^k, \quad \forall k \in K, \quad (7.2.5)$$

$$r_j^k \in \{0,1\}, \forall j \in J, \forall k \in K, \quad (7.2.6)$$

$$\sum_{j \in J} r_j^k = 1, \forall k \in K. \quad (7.2.7)$$

Выражение (7.2.3) соответствует максимизации целевой функции лидера, условие (7.2.4) отражает его смешанные стратегии. Задача второго уровня (7.2.5 – 7.2.7) показывает, что агенты максимизируют свою полезность, давая наилучший ответ в чистой стратегии на смешанную стратегию лидера. Если у агента имеется несколько оптимальных стратегий, то в задаче первого уровня выбирается та, которая устраивает лидера.

В игре безопасности Штакельберга защитник распределяет ресурсы для защиты множества  $J = \{1, \dots, n\}$  объектов, причем он может защитить одновременно  $m < n$  объектов. Множество чистых стратегий защитника обозначим  $I$ , стратегий атакующих –  $J$ . Выигрыши игроков зависят только от того, защищен или нет атакуемый объект.

Обозначим  $D^k$  полезность защитника при столкновении с атакующим  $k \in K$  и  $A^k$  – полезность  $k$ -го атакующего. Полезности игроков зависят от того, защищен или нет  $j$ -й объект:

|           | Защищен    | Не защищен |
|-----------|------------|------------|
| Защитник  | $D^k(j p)$ | $D^k(j u)$ |
| Атакующий | $A^k(j p)$ | $A^k(j u)$ |

Обозначим  $c_j$  – вероятность (частота) защиты  $j$ -го объекта:

$$c_j = \sum_{i \in I: j \in i} x_i, \forall j \in J, \quad (7.2.8)$$

т. е. частота защиты  $j$ -го объекта есть сумма вероятностей применения стратегий по защите этого объекта. Значения  $q_j^k$  указывают, наносит ли  $k$ -й атакующий удар по этой цели.

Ожидаемые полезности защитника и атакующих соответственно равны:

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \pi^k q_j^k \{c_j D^k(j|p) + (1-c_j) D^k(j|u)\}, \quad (7.2.9)$$

$$\sum_{j \in J} q_j^k \{c_j A^k(j|p) + (1-c_j) A^k(j|u)\}, \forall k \in K. \quad (7.2.10)$$

Решение игры безопасности Штакельберга также формулируется как задача двухуровневого программирования (с учетом ограничений (7.2.4) и (7.2.8)) [436]:

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \pi^k q_j^k \{c_j D^k(j|p) + (1-c_j) D^k(j|u)\} \rightarrow \max, \quad (7.2.11)$$

$$q^k \in \arg \max_{r^k} \sum_{j \in J} q_j^k \{c_j A^k(j|p) + (1-c_j) A^k(j|u)\}, \forall k \in K, \quad (7.2.12)$$

$$r_j^k \in \{0,1\}, \forall j \in J, \forall k \in K, \quad (7.2.13)$$

$$\sum_{j \in J} r_j^k = 1, \forall k \in K. \quad (7.2.14)$$

Целевая функция защитника подлежит максимизации. Ограничения (7.2.4) и (7.2.8) характеризуют большое число смешанных стратегий защитника и связывают их с частотой защиты объектов. Остальные выражения относятся к задаче второго уровня, которая гарантирует, что атакующие максимизируют свои целевые функции (каждый из них атакует единственную цель).

Другие возможные формулировки игры безопасности Штакельберга, результаты вычислительных экспериментов и практические приложения теоретико-игровых задач можно найти в [496; 436].

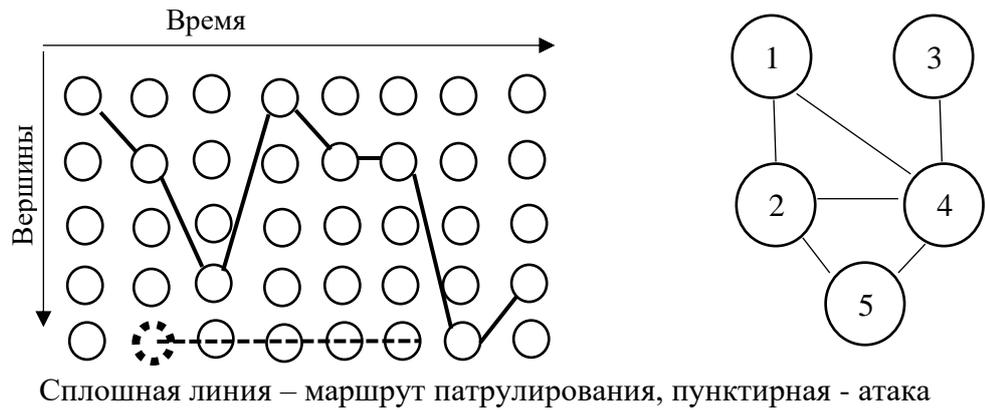
Далее рассмотрим подкласс игр безопасности – *игры патрулирования*<sup>1</sup>.

### 7.2.3. Игры патрулирования на графе

Игры патрулирования на графах могут быть классифицированы по числу участников (один защитник, один атакующий, несколько защитников и атакующих) и по их типам, с дискретным или непрерывным временем, по ограничениям на выигрыши, по наличию или отсутствию кооперации между игроками и т. д. (см. работы [126; 127; 409; 447; 513]). Эти игры возникают в задачах охраны военных баз и важных объектов.

В играх с дискретным временем задается временной горизонт  $T$  игры (например, это обход заданных вершин защитником). Игроки делают ходы в дискретные моменты времени  $t = 1, \dots, T$ . Атакующий выбирает  $i$ -ю вершину графа и время  $\tau$  атаки. Для успеха атаки ему надо непрерывно быть в вершине  $m$  периодов времени,  $m \leq T$ . Защитник выбирает маршрут обхода  $w$  вершин графа. Если он перехватывает атакующего, то его действия считаются успешными, иначе – неуспешными (рис. 7.2.1). На рисунке показан маршрут патрулирования  $w = 1-2-4-1-2-2-5-4$ . Атака на вершину 5 в момент времени  $\tau = 2$ ,  $m = 4$ . Поскольку защитник не перехватывает атакующего, то атака успешна [409].

<sup>1</sup> Проблемы патрулирования (problems of patrolling) изучаются с 1970 годов. В ранних работах полагалось, что вероятность нахождения атакующего (частота преступлений) в разных местах района поиска или постоянна, или известна защитнику. В последующем для исследования проблем патрулирования стали использоваться игры поиска (search games) и игры инфильтрации (проникновения, infiltration games).



Сплошная линия – маршрут патрулирования, пунктирная - атака

Рис. 7.2.1. Пример игры патрулирования на графе

В статье [513] рассматривается задача патрулирования на графе. Патрульный перемещается по ребрам графа с задачей обнаружения атак на узлы. За единицу времени он может переместиться только по одному ребру. Возможны два типа атакующих: 1) неподготовленный атакующий (random attacker) с известным защитнику распределением атак по узлам и 2) подготовленный атакующий (strategic attacker), с которым у защитника игра с нулевой суммой.

При нахождении атакующего в  $i$ -й вершине графа, ему требуется случайное время  $X_i$  для завершения атаки. Плотность распределения случайной величины  $X_i$  известна и атакующему и защитнику. Задача нахождения оптимальных маршрутов патрулирования сведена к задаче линейного программирования (с использованием эвристики для формирования ограниченного количества шаблонов патрулирования). Разработанные алгоритмы могут быть использованы в качестве рекомендаций в задаче построения графа патрулирования.

В статье [127] рассматривается теоретико-игровая модель патрулирования на графе, в которой атакующий имеет  $m$  единиц времени для атаки некоторой вершины графа, а стратегией патрулирующего является выбор пути на графе. Найдены равновесие Нэша в игре с нулевой суммой и средняя длина патрулирования (длина пути до поимки атакующего либо длина пути патрулирования) для различных графов (цикл, звезда, линейный граф).

Игра патрулирования:  $G = \langle P, A, Q, S_1, S_2, H \rangle$ , где  $P$  – защитник (патрулирующий),  $A$  – атакующий,  $Q = \langle V, E \rangle$  – неориентированный связный граф ( $V$  – множество вершин,  $E$  – множество ребер,  $n = |V|$  – количество вершин в графе),  $S_1$  и  $S_2$  – множества стратегий защитника и атакующего соответственно. Вершины графа обозначены  $v_j, j = 1, \dots, n$ . Разные вершины графа могут соединяться только одним ребром, допустимы ребра вида  $(v_k, v_k)$ .

Множество стратегий защитника  $S_1$  представляет пути патрулирования  $u = v_{k_1} - v_{k_2} - \dots - v_{k_T}$ , где  $\forall j = 1, \dots, T: v_{k_j} \in V, 1 \leq k_j \leq n, T \geq 1; \forall t = 1, \dots, T-1: (v_{k_t}, v_{k_{t+1}}) \in E$ . Элементы множества стратегии атакующего  $S_2$  (атаки) представляются в виде

$$\underbrace{0 - \dots - 0}_t - \underbrace{v - \dots - v}_m - 0 - \dots - 0, \quad t = 0, \dots, T-m,$$

или более кратко  $w = (t, v)$ , где  $t$  – момент посещения вершины  $v$ .

Функцией выигрыша  $H(u, w)$ ,  $u \in S_1, w \in S_2$ , является вероятность поимки атакующего защитником:

$$H(u, w) = \begin{cases} 0, & \forall j = 1, \dots, m: v_{k_{t+j}} \neq v, \\ 1, & \exists j = 1, \dots, m: v_{k_{t+j}} = v. \end{cases}$$

Игра  $G = \langle P, A, Q, S_1, S_2, H \rangle$  для краткости записывается как  $G(Q, T, m)$ , где  $m$  – время, необходимое атакующему для проведения атаки,  $T$  – длина пути ( $m \leq T$ ).

Доказано, что в игре  $G(Q, T, 1)$  значение игры равно  $H^* = 1/n$ . Далее авторами получены значения игры для цикла, звезд и линейного графа [127].

В играх патрулирования с непрерывным временем (см. [409]) атака может произойти в любой точке сети (не обязательно в вершине) и в любое время. Продолжительность атаки фиксирована.

#### **7.2.4. Теоретико-игровые модели обеспечения транспортной безопасности**

Транспортные объекты (аэропорты, метро и т. д.) часто являются целями террористических атак, и обеспечению их безопасности правительства многих стран уделяют особое внимание.

Службы безопасности аэропортов используют программный помощник для планирования графиков проверок на контрольно-пропускных пунктах при въезде в аэропорт и патрулировании в терминалах аэропорта [533].

Вводятся следующие предположения:

- атакующие (террористы) могут наблюдать за действиями защиты и, исходя из этого, выбирать время и место атаки;
- тип атакующих неизвестен.

Для поиска оптимальных стратегий защитника используется байесовская игра безопасности Штакельберга. Обозначим  $x$  – вектор стратегий защитника. Компонент  $x_i$  вектора – вероятность применения защитником  $i$ -й

стратегии. Соответственно  $q^l$  – это вектор стратегий атакующего типа  $l \in L$  (например, террорист, контрабандист, преступник). Пусть  $X$  и  $Q$  – множества стратегий защитника и атакующего соответственно. Платежные матрицы защитника  $R^l$  и атакующего  $C^l$  формируются для каждого типа атакующего. Пусть  $M$  – достаточно большое положительное число. Заданы априорные вероятности  $p^l$  распределения атакующих по типам,  $l \in L$ . Задача нахождения решения защитника [533]:

$$\max_{x, q, a} \sum_{i \in X} \sum_{l \in L} \sum_{j \in Q} p^l R_{ij}^l x_i q_j^l, \quad (7.2.15)$$

с выполнением ограничений

$$\sum_{i \in X} x_i = 1, 0 \leq x_i \leq 1, \sum_{j \in Q} q_j^l = 1, q_j^l \in \{0, 1\},$$

$$0 \leq \left( a^l - \sum_{i \in X} C_{ij}^l x_i \right) \leq (1 - q_j^l) M, a \in \mathbb{R}.$$

Последнее ограничение – линеаризованная форма условий оптимальности атакующего. Задача квадратичного программирования (7.2.15) может быть сведена к задаче смешанного целочисленного линейного программирования (mixed integer linear programming) заменой переменных  $z_{ij}^l = x_i q_j^l$ .

Использование компьютерного помощника позволило службам безопасности международного аэропорта Лос-Анджелес и полиции сократить время на рутинные работы по планированию расписаний и повысило качество принимаемых решений. В последующем модель и программный помощник при поддержке администрации транспортной безопасности были масштабированы на 400 аэропортов США [534].

В рассмотренной работе по обеспечению безопасности аэропорта неопределенность, связанная с типом нарушителя (террорист, контрабандист, преступник) устранялась применением байесовской игры безопасности (оценивалась вероятность принадлежности атакующего некоторому типу, а степень его общественной опасности учитывалась в значениях платежной матрицы). Однако можно указать несколько факторов, ограничивающих применение байесовских игр:

– защитнику неизвестны вероятности распределения атакующих по типам;

– не всегда возможно или нежелательно сравнивать выигрыши защитника для разных типов противника (в одном случае возможны акты с гибелью людей, в другом случае цель противника заключается в нанесении материального ущерба и т. д.);

– формируется единственное решение, скрывающее для конечного пользователя компромиссы, связанные с типом атакующего.

Второй возможный способ устранения названной неопределенности предложен в работе [428] – это концепция многокритериальных игр безопасности (multi-objective security games): вместо единственного оптимального решения получается набор оптимальных по Парето (не доминируемых) решений, формируемых в задачах однокритериальной оптимизации с ограничениями.

Таким образом, игра «атакующий-защитник» в настоящее время активно развивается и находит множество приложений в задачах специальных действий и обеспечения безопасности населения, объектов и районов. Некоторые модели реализованы в виде программного обеспечения и используются службами безопасности транспортных и других объектов.

Далее рассмотрим особенности специальных действий и обеспечения безопасности в морском пространстве.

### **7.3. Модели борьбы с морским пиратством и терроризмом**

Морские перевозки исторически играли существенную роль в торговле и глобализации. В современном мире морские перевозки составляют около 90% объема мировой торговли, а морская торговля представляет собой одно из важнейших средств обеспечения процветания мировой экономики [456]. Интенсивно развивается портовая инфраструктура, разрабатываются и вводятся в эксплуатацию плавучие атомные тепловые и электростанции. В связи с изменениями климата возрастает роль в мировой торговле Северного морского пути. Однако морской транспорт подвергается серьезной угрозе со стороны морского пиратства и терроризма.

Пиратские и разбойные акты на море известны со времен Древней Греции и Рима, как например, случай захвата Гая Юлия Цезаря в 76 г. до н. э. пиратами [358]. К актам незаконного силового характера также относятся действия военных кораблей и катеров, нарушающих международное и национальное право (неправомерные действия в территориальных водах другого государства и т. п.), неправомерные действия экологических и других организаций и др.

Росту пиратских, разбойных и террористических актов на море способствуют следующие причины [311]:

– снижение жизненного уровня и социальной защищенности граждан ряда прибрежных государств, что побуждает их к занятиям преступной деятельностью;

– рост международной торговли и морских перевозок;

– сокращение численности экипажей судов в связи с автоматизацией и механизацией;

– стремление ряда государств решать военно-политические задачи непрямыми методами, включая использование в своих целях террористов и пиратов и др.

Несмотря на предпринимаемые правительствами и судовладельцами защитные меры, угроза пиратских и террористических актов остается высокой. Даже выделение военных эскортов не обеспечивает надежную защиту транспортных и пассажирских судов. Легкость, с которой совершаются незаконные силовые акты, объясняется следующими причинами: во-первых, не в каждом морском районе действуют военные эскорты, во-вторых, даже при наличии военных кораблей невозможно обеспечить полное сопровождение каждого судна.

Таким образом, борьба с незаконными силовыми актами на море является актуальной задачей. Вместе с тем, известно небольшое количество научных публикаций, посвященных моделированию специальных действий на море (см. работы [445; 456; 480] и обзоры литературы в них). Содержательные и методические рекомендации по борьбе с пиратством и морским терроризмом представлены в работах [229; 284; 396].

В 1948 г. в Женеве (Швейцария) была учреждена Международная морская организация (ИМО), отвечающая за организацию обеспечения безопасности на море и защиту окружающей среды. Под управлением ИМО ведется Глобальная интегрированная система информации о судоходстве (ГИСИС)<sup>1</sup>, включая отчеты о разбойных и пиратских инцидентах на море. Далее, с использованием отчетов ГИСИС, выполним статистический анализ пиратских, террористических и разбойных актов на море.

---

<sup>1</sup> International Maritime Organization. GISIS: Piracy and Armed Robbery. – URL: <https://gisis.imo.org/Public/PAR/Default.aspx> (дата обращения: 16.07.2024).

### 7.3.1. Статистический анализ незаконных силовых актов на море

На рис. 7.3.1 показано количество инцидентов, связанных с силовыми действиями, пиратскими и разбойными актами в международных водах, в территориальных водах и в портах по данным ГИСИС, см. [396].



Рис. 7.3.1. Количество зарегистрированных инцидентов

Из рисунка видно, что максимальное количество силовых актов пришлось на 2011 год, что связано с высокой активностью сомалийских пиратов и разбойников. Далее будем рассматривать и анализировать только силовые акты в международных водах, поскольку там затруднены действия по нейтрализации пиратов (разбойников) в силу значительного пространственного размаха и более тяжелых последствий для экипажей судов.

На рис. 7.3.2 показано количество инцидентов в международных водах за период с 2009 по 2019 год и доля успешных инцидентов, завершившихся захватом судна и/или экипажа, или их ограблением.

Анализ описаний инцидентов позволил выявить характерные тактические приемы нападающих. Пираты (разбойники) стараются действовать на рассвете или в сумерках, когда пиратов трудно заметить и оценить их количество и вооружение. Для захвата судна и экипажа пираты часто используют материнское судно (часто с заложниками на борту). При обнаружении поблизости потенциальной жертвы пираты на скоростных катерах отходят от материнского судна и предпринимают атаку. Силовые акты достаточно скоротечны, поэтому военная (полицейская) помощь не всегда оказывается своевременной.

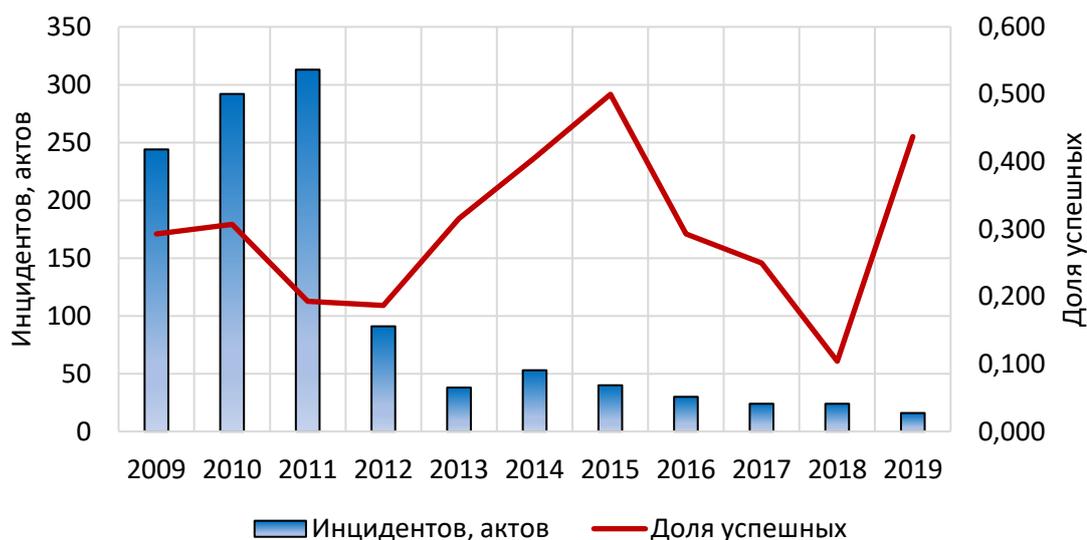


Рис. 7.3.2. Количество инцидентов в международных водах, доля успешных

В таблице 7.3.1 показано количество актов и доля успешных с детализацией по типам судов.

Таблица 7.3.1. Количество силовых актов и их результативность по типам судов (2009–2020 гг.)

| Тип судна (англ.)          | Тип судна (русское)                  | Кол-во актов | Доля успешных (1) | Доля успешных (2) |
|----------------------------|--------------------------------------|--------------|-------------------|-------------------|
| Dhow                       | парусно-моторное судно               | 12           | 1,000             | 1,000             |
| Yacht                      | яхта                                 | 12           | 0,867             | 0,880             |
| Tug                        | буксир                               | 52           | 0,687             | 0,757             |
| Fishing vessel             | рыболовное судно                     | 53           | 0,662             | 0,667             |
| Supply ship                | судно снабжения                      | 17           | 0,647             | 0,733             |
| Oil product tanker         | танкер для нефтепродуктов            | 5            | 0,400             | 0,500             |
| Barge carrier              | баржевоз                             | 10           | 0,500             | 0,714             |
| Passenger ship             | пассажирское судно                   | 5            | 0,400             | 0,667             |
| Refrigerated cargo carrier | рефрижераторное судно                | 9            | 0,389             | 0,313             |
| Product tanker             | танкер-продуктовоз                   | 107          | 0,364             | 0,459             |
| Нет данных                 | -                                    | 14           | 0,321             | 0,214             |
| General cargo ship         | сухогруз общего назначения           | 129          | 0,312             | 0,393             |
| Heavy load carrier         | грузовое судно                       | 5            | 0,300             | 1,000             |
| Chemical tanker            | танкер-химовоз                       | 131          | 0,267             | 0,290             |
| Bulk carrier               | балкер (навалочник)                  | 256          | 0,207             | 0,229             |
| Tanker                     | танкер                               | 196          | 0,191             | 0,244             |
| Special purpose ship       | судно специального назначения        | 6            | 0,167             | 0,167             |
| Oil tanker                 | нефтяной танкер                      | 40           | 0,150             | 0,136             |
| Ro-ro-cargo ship           | ролкер (перевозка грузов на колесах) | 15           | 0,133             | 0,200             |
| Vehicle carrier            | ролкер (перевозка грузов на колесах) | 16           | 0,125             | 0,167             |
| Container ship             | контейнеровоз                        | 153          | 0,122             | 0,161             |

| Тип судна (англ.)           | Тип судна (русское)       | Кол-во актов | Доля успешных (1) | Доля успешных (2) |
|-----------------------------|---------------------------|--------------|-------------------|-------------------|
| LPG tanker                  | газовоз                   | 12           | 0,083             | 0,167             |
| Patrol boat                 | Патрульная лодка          | 1            | 0                 | 0                 |
| Reefer                      | рефрижератор              | 1            | 0                 | 0                 |
| Gas carrier - non-specified | газовоз                   | 1            | 0                 |                   |
| Livestock carrier           | судно для перевозки скота | 1            | 0                 | 0                 |
| Ore/bulk/oil Carrier        | нефтерудовоз              | 1            | 0                 |                   |
| Warship                     | Военный корабль           | 1            | 0                 |                   |
| Cement carrier              | цементовоз                | 1            | 0                 | 0                 |
| Research ship               | исследовательское судно   | 5            | 0                 |                   |
| Gas carrier - LNG           | газовоз СПГ               | 3            | 0                 | 0                 |
| Multi purpose ship          | многоцелевое судно        | 1            | 0                 |                   |
| Общий итог                  |                           | 1271         | 0,259             | 0,373             |

В столбце «Доля успешных (1)» указана доля успешных актов по всей выборке из ГИСИС, а в столбце «Доля успешных (2)» только по тем актам, где в базе данных есть сведения о количестве судов и пиратских катеров, а также указаны численности пиратов и экипажа (сокращенная выборка). Коэффициент корреляции между данными последних двух столбцов таблицы равен 0,89. Столь высокое значение коэффициента корреляции дает основания использовать сокращенную выборку для количественного анализа силовых актов.

На рис. 7.3.3 показаны примеры защиты судов от пиратских атак [529].

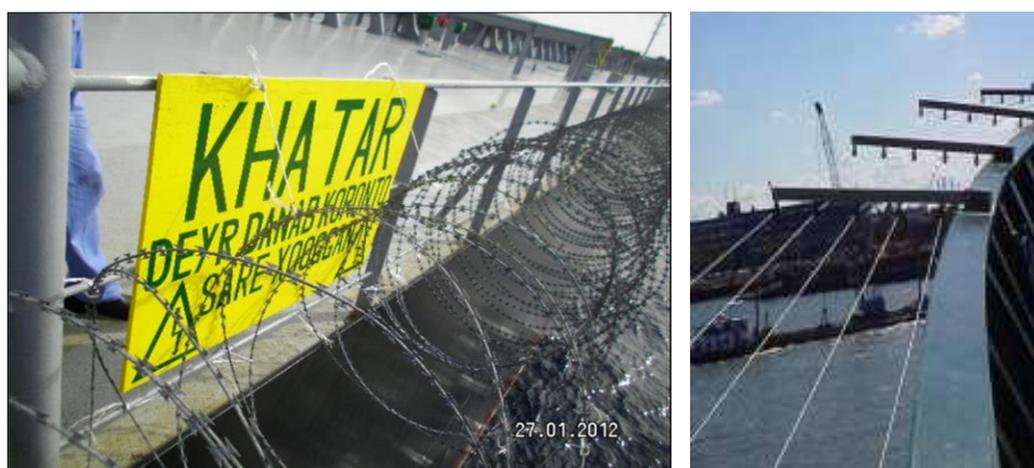


Рис. 7.3.3. Защитные заграждения на судне

Заграждения устанавливаются в течение нескольких часов при входе в пиратоопасный район. Электрические барьеры обычно используют напряжение 9 000 вольт для нанесения несмертельных травм. Комплексная защита судна включает три уровня обороны [422], рис. 7.3.4.

Первый уровень обеспечивается слаженными действиями экипажа (непрерывное наблюдение, маневрирование судна), установкой заграждений, использованием сигнализации и других антипиратских мер.

Второй уровень обороны включает усиление дверей и их защиту от взлома, установку дополнительных ворот и решеток, датчиков движения.

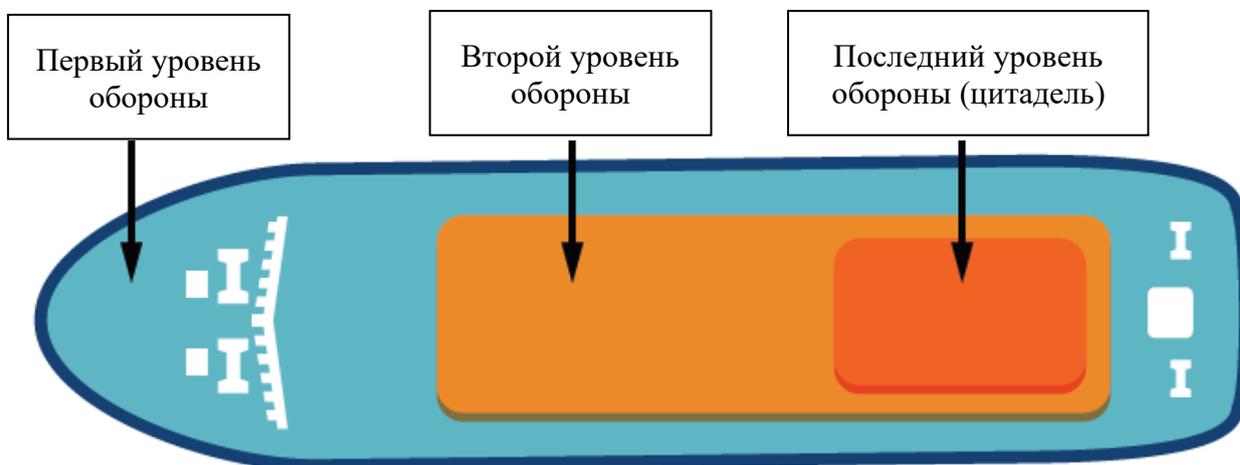


Рис. 7.3.4. Комплексная защита судна

К последнему уровню обороны обычно относят оборудование цитадели – специального помещения с крепкими, бронированными дверями в глубине судна, где экипаж, в случае проникновения на борт вооруженных пиратов, сможет запереться, загерметизировать помещение, установить связь с военным кораблем и выиграть время, необходимое для оказания помощи силами военного корабля.

В таблице 7.3.2 показаны «веса» и эффективность основных факторов, способствующих отражению силового акта.

Таблица 7.3.2. Веса и эффективность факторов, способствующих отражению силового акта

| Фактор                           | Вес  | Эффективность |
|----------------------------------|------|---------------|
| Скорость, маневрирование         | 3811 | 0,99          |
| Антипиратские меры               | 2776 | 0,94          |
| Вооруженная охрана               | 1986 | 1,00          |
| Помощь военного корабля, авиации | 1048 | 0,88          |
| Цитадель                         | 291  | 0,50          |

Поскольку меры против пиратства применяются в комплексе, то представленные эффективности являются условными – в случае нападения пиратов обычно применяются и антипиратские меры, и маневрирование и т. д.

Приведем примеры отчетов об инцидентах на море из ГИСИС.

*Пример 1.* 13.07.2019 г. вооруженные пираты на двух скоростных катерах приблизились к судну, поднялись на борт и угнали его. Владельцы не

смогли связаться с судном и немедленно сообщили об этом нигерийским властям. Информационный центр по пиратству (IMB PRC) получил информацию от нигерийских властей и связался с владельцами. Центр морских операций ВМФ Ганы направил патрульный катер для перехвата судна. 15.07.2019 г. патрульный катер ВМФ Ганы обнаружил судно и отвел его в безопасный порт для расследования. Сообщалось, что 10 членов экипажа были похищены с корабля. 19.08.2019 г. владельцы подтвердили, что 10 похищенных членов экипажа были благополучно освобождены 09.08.2019 г.

*Пример 2.* 23.06.2017 г. шесть пиратов, вооруженных ружьями и ножами, поднялись на борт и взяли под контроль химический танкер. Они заперли всех членов экипажа в машинном отделении. Пираты проинструктировали судового инженера по работе с насосом и откачали груз дизельного топлива на свой корабль. 1,5 миллиона литров дизельного топлива было откачено с корабля и перенесено на другое судно, после чего пираты освободили всех членов экипажа в 04:20 24.06.2017 г. Перед тем как покинуть корабль, пираты повредили судовое коммуникационное и навигационное оборудование. Члены экипажа отплыли в безопасный порт.

Далее рассмотрим простейшие модели борьбы с пиратскими и террористическими актами на море.

### **7.3.2. Аналитическая модель оценки эффективности мер по борьбе с пиратством**

В таблице 7.3.3 показаны статистические результаты силовых актов в зависимости от количества лодок (катеров, скифов) у пиратов при попытках захвата ими судна. Из анализа исключены нападения на суда типа dhow и yacht.

Таблица 7.3.3. Результаты силовых актов в зависимости от количества пиратских лодок

| Пиратских лодок | Количество актов | Вероятность обнаружения пиратов до их подъема на борт | Вероятность успеха силового акта |
|-----------------|------------------|---|----------------------------------|
| 1               | 722 / 278        | 0,77 / 0,20   | 0,28 / 0,71                      |
| 2               | 328 / 93         | 0,95 / 0,56   | 0,25 / 0,86                      |
| 3               | 78 / 16          | 1 / 1   | 0,19 / 0,93                      |
| 4               | 21 / 4           | 1 / 1   | 0,12 / 0,63                      |
| 5               | 13 / 1           | 1 / -   | 0,02 / 0,3                       |
| 6               | 11 / 3           | 1 / -   | 0,27 / 1                         |

Левое число в столбцах 2–4 таблицы – показатель по всем силовым актам, правое число – показатель по актам, в которых пиратам удалось

подняться на борт судна. Данные последней таблицы позволяют предположить, что количество пиратских лодок не является определяющим фактором при анализе пиратских и разбойных актов.

Пусть первая сторона (нападающие) – это пираты, стремящиеся захватить судно, или военная команда, имеющая цель освобождения захваченного судна и экипажа; вторая сторона (обороняющиеся) – экипаж судна, уклоняющийся от захвата пиратами, или пираты, сопротивляющиеся освобождению судна военными (полицейскими) силами.

Обозначим  $x > 0$  – численность нападающих (первой стороны), а  $y > 0$  – численность обороняющихся (второй стороны). Воспользовавшись функцией победы (см. раздел 3.2.2), получим выражение для вероятности победы первой стороны:

$$p_x(x, y) = \frac{\beta x}{\beta x + y} = \frac{q}{q + 1}, \quad q = \frac{\beta x}{y}, \quad (7.3.1)$$

где:  $\beta$  – параметр превосходства первой стороны (зависит от умения сторон действовать в условиях риска для жизни и здоровья, а также и от их технологических возможностей),  $q$  – отношение сил сторон.

С использованием метода максимального правдоподобия выполнена статистическая оценка параметра превосходства (на объеме выборки, равной 720) и получено следующее значение –  $\beta \approx 1,4$ , т. е. один нападающий почти в полтора раза эффективнее единицы обороняющейся стороны [396].

Гипотеза о принадлежности статистической выборки (численности сторон в силовом акте и его исход) теоретическому закону (7.3.1) проверена с использованием статистического критерия хи-квадрат. Для чего выборка сгруппирована по восьми интервалам (рис. 7.3.5).

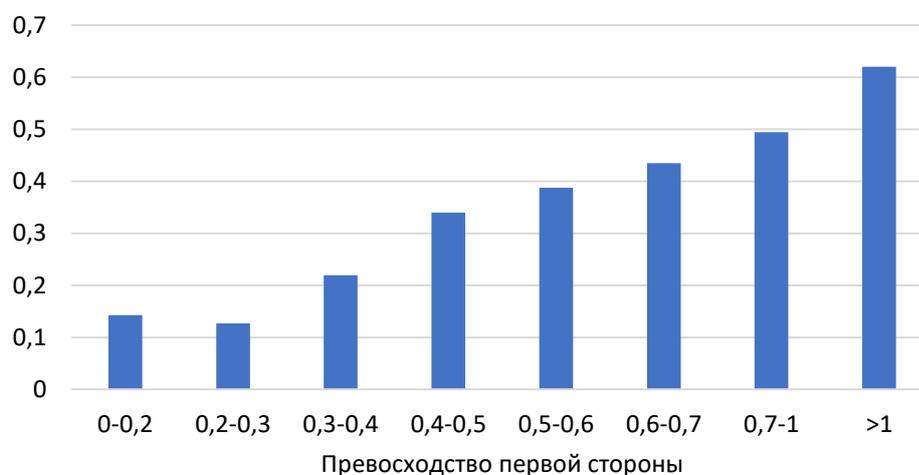


Рис. 7.3.5. Зависимость успешности силовых актов от превосходства первой стороны

С уровнем значимости 0,05 выборка с результатами силовых актов в морском пространстве за 2009–2020 гг. подчиняется закону (7.3.1).

Поскольку параметр превосходства определяется психологическим и технологическим факторами, то для его оценки воспользуемся выражением (см. (3.2.11)):

$$\beta = \varphi\rho, \quad (7.3.2)$$

где:  $\varphi$  – параметр морального превосходства первой стороны над второй,  $\rho$  – параметр технологического превосходства.

О важности учета морально-психологических характеристик сторон свидетельствует следующий факт<sup>1</sup>. 23 марта 2007 г. 8 матросов и 7 морских пехотинцев британских ВМС были захвачены в иранских территориальных водах иранскими гвардейцами. Британская пресса задается следующими вопросами. Первое, что хотят узнать, это почему британские моряки оказались такой легкой добычей для иранцев. Почему находившийся поблизости эсминец «Корнуолл», на котором, собственно, и базировались эти захваченные моряки, им не помог, хотя оттуда и даже без бинокля было видно, что происходит? Следующий вопрос: почему вертолет с «Корнуолла», который прикрывал моряков, когда они проводили досмотр торгового судна – то есть в момент захвата их иранцами – вернулся на корабль, оставив их без прикрытия во время захвата, во время ареста? И главное: почему англичане сами не оказали сопротивления?

Содержательный анализ описаний действий по захвату (освобождению) судов позволяет выделить два этапа: 1) блокирование судна и/или создание условий для высадки на его борт; 2) нейтрализация экипажа (пиратов).

Исходя из анализа базы данных инцидентов на море, можно выделить следующие факторы, определяющие технологическое превосходство первой стороны в средствах блокирования (первый этап действий):

- возможности по разведке (мониторингу);
- скоростные характеристики судов;
- их маневренные характеристики;
- вооружение сторон, способствующее или препятствующее блокированию;
- возможности для абордажа (высота борта судна).

---

<sup>1</sup> Голицина Н., Сиротин А. С самолета на допрос: английские моряки расскажут о захвате // Радио Свобода, 06.04.2007. – URL: <https://www.svoboda.org/a/386620.html> (дата обращения: 01.04.2024).

Отметим факторы, определяющие успешность действий первой стороны по нейтрализации персонала (второй этап действий):

- возможности по перемещению на судне;
- возможности оружия при действии на судне.

Если первая сторона – это группа захвата, имеющая цель освободить захваченные судно и экипаж, то нужно учитывать возможности пиратов по захвату заложников и угрозы их убийства.

Тогда параметр  $\rho$  технологического превосходства можно оценить по формуле среднего геометрического:

$$\rho = p_0 \sqrt[6]{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6} = p_0 \sqrt[6]{\frac{v_1 d_2 r_1 h_1 e_1 b_1}{v_2 d_1 r_2 h_2 e_2 b_2}}, \quad (7.3.3)$$

где:  $p_0$  – вероятность обнаружения нападающих экипажем судна;  $\alpha_1, \dots, \alpha_6$  – параметры превосходства первой стороны в скорости, маневренности, вооружению при блокировании, возможностях для абордажа, по перемещению на судне и по вооружению на борту судна;  $v_1$  ( $v_2$ ) – скорость судна первой (второй) стороны;  $d_1$  ( $d_2$ ) – диаметр циркуляции<sup>1</sup> судна первой (второй) стороны;  $r_1$  ( $r_2$ ) – дальность поражения противника первой (второй) стороной при блокировании судна;  $h_1$  – высота судна нападающих (с учетом высоты типового средства высадки на палубу захватываемого судна),  $h_2$  – высота судна второй стороны;  $e_1$  ( $e_2$ ) – скорость перемещения первой (второй) стороны по судну;  $b_1$  ( $b_2$ ) – дальность эффективного поражения противника первой (второй) стороны на борту судна.

Превосходство в скорости перемещения боевых единиц по палубе определяет маневренность групп, их способность быстро концентрироваться в нужном месте. Наличие цитадели существенно снижает возможности нападающих по перемещению с целью взятия судна под свое управление. При расчете дальности эффективного поражения противника на борту судна необходимо учитывать его защищенность, а также наличие на судне заложников и опасных грузов.

Полученные аналитические выражения, во-первых, соответствуют выявленным статистическим зависимостям, и, во-вторых, позволяют прогнозировать эффективность новых тактических приемов и технологий, которые могут использовать как нападающая, так и обороняющаяся сторона.

Исходя из анализа пиратских актов, можно предположить, что время захвата пиратами судна с экипажем подчиняется показательному закону с

<sup>1</sup> Диаметр циркуляции обычно составляет от 4 до 8 длин корпуса судна (корабля).

математическим ожиданием 1–3 часа. Тогда потребное количество военных кораблей (вертолетов, беспилотных ударных систем) для защиты судов от пиратских атак можно рассчитать с учетом следующего выражения:

$$p_s = 1 - \exp(-\lambda t) = 1 - \exp\left(-\frac{l}{t_s v}\right), \quad (7.3.4)$$

где:  $p_s$  – вероятность своевременных действий военной группы по нейтрализации пиратского акта;  $t_s$  – ожидаемая продолжительность пиратского акта;  $l$  – удаление военного корабля от места пиратской атаки;  $v$  – скорость военного корабля.

### ***7.3.3. Применение ИНС для анализа мер по борьбе с пиратством***

Активное развитие искусственного интеллекта (ИИ) началось в 1940-е годы и имело две цели [279]:

- 1) выявление сущности естественного (человеческого) интеллекта;
- 2) использование машинного интеллекта для преобразования новых знаний и для решения интеллектуальных задач.

Первую цель выполняют нейрофизиологи и психологи. Они контролируют модель поведения человека при решении задач и затем ее корректируют.

Вторую цель выполняет исследователь-математик. Он синтезирует интеллектуальное поведение системы независимо от методов, которыми пользуются люди.

В конце 1950-х годов начали разрабатываться и создаваться первые нейросети и нейрокомпьютеры американскими учеными У. МакКаломом, У. Питтсом, Ф. Розенблаттом, представляющие и в настоящее время нейрокомпьютерное направление систем ИИ.

Работы в области ИИ начались с зарождения нейрокибернетики. Так как мозг человека состоит из множества нервных клеток – нейронов, то исследователи пытались строить разумные машины, имитируя поведение коллектива нейронов. Основную идею нейрокибернетики можно сформулировать следующим образом. Единственный объект, способный мыслить, – это человеческий мозг. Поэтому любое мыслящее устройство должно быть обязательно выполнено по образу и подобию человеческого мозга, воспроизводить его структуру, его принцип действия. Таким образом,

нейрокибернетика занимается аппаратным моделированием структуры мозга и его деятельности.

Термин «искусственный интеллект» был предложен на семинаре Дартсмутского колледжа (США) в 1956 году. Первые работы по ИИ проводились в Массачусетском технологическом институте под руководством М. Минского и Дж. Маккарти, в университете Карнеги-Меллона под руководством Г. Саймона и А. Ньюэлла.

В 1960–1970-е гг. работы в области искусственного интеллекта шли по следующим направлениям [279]:

1. Отказ от поиска универсального алгоритма мышления и моделирование конкретных знаний экспертов. К концу 1960-х годов было обнаружено, что для решения практически важных задач недостаточно одних знаний общего характера (общих стратегий поиска решений). Успешное решение прикладных задач возможно только при наличии хорошо структурированных специальных знаний.

2. Решаются задачи понимания естественного языка и обработки изображений.

3. Предложено эволюционное программирование (моделирование), то есть процесс моделирования человека заменялся моделированием процесса его эволюции. Впервые предложено решение сложных задач моделированием эволюции с помощью компьютерных алгоритмов (генетических алгоритмов).

Принято считать, что в России ИИ зародился в 1954 г. (начало работы семинара «Автоматы и мышление» в МГУ им. М. В. Ломоносова под руководством академика А. А. Ляпунова, в котором принимали участие физиологи, лингвисты, психологи и математики). В 1965–1980 гг. происходит рождение нового направления – ситуационного управления. Основателем этой научной школы стал профессор Д. А. Поспелов.

В 1974 г. при Комитете по системному анализу при президиуме АН СССР был создан научный совет по проблеме «Искусственный интеллект». По инициативе совета было организовано пять комплексных научных проектов, которые возглавили ведущие специалисты в данной области: «Диалог» – работы по пониманию естественного языка, руководители – А. П. Ершов, А. С. Нариньяни; «Ситуация» – ситуационное управление, Д. А. Поспелов; «Банк» – банки данных, Л. Т. Кузин; «Интеллект робота» – Д. Е. Охоцимский.

Перечислим актуальные направления развития систем искусственного интеллекта (см. также раздел 4.3 в [336]).

1. *Представление знаний и разработка систем, основанных на знаниях.* Это основное направление искусственного интеллекта. Оно связано с разработкой моделей представления знаний, созданием баз знаний, образующих ядро экспертных систем (ЭС). В последнее время включает в себя модели и методы извлечения и структурирования знаний и сливается с инженерией знаний.

2. *Игры и творчество.* Традиционно искусственный интеллект включает в себя игровые интеллектуальные задачи – шахматы, шашки, го.

3. *Разработка естественно-языковых интерфейсов и машинный перевод.* В 1950-х гг. одной из популярных тем исследований искусственного интеллекта являлась область машинного перевода. Первая программа в этой области – переводчик с английского языка на русский. Первая идея – пословный перевод, оказалась неплодотворной. В настоящее время используется более сложная модель, включающая анализ и синтез естественно-языковых сообщений, которая состоит из нескольких блоков. Для анализа это:

- морфологический анализ – анализ слов в тексте;
- синтаксический анализ – анализ предложений, грамматики и связей между словами;
- семантический анализ – анализ смысла каждого предложения на основе некоторой предметно-ориентированной базы знаний;
- прагматический анализ – анализ смысла предложений в окружающем контексте на основе собственной базы знаний.

Синтез включает аналогичные этапы, но несколько в другом порядке.

4. *Распознавание образов.* Каждому объекту ставится в соответствие матрица признаков, по которой происходит его распознавание. Это направление близко к машинному обучению, тесно связано с нейрокибернетикой.

5. *Новые архитектуры компьютеров.* Это направление занимается разработкой новых аппаратных решений и архитектур, направленных на обработку символьных и логических данных. Создаются Пролог- и Лисп-машины, компьютеры V и VI поколений. Последние разработки посвящены компьютерам баз данных и параллельным компьютерам.

6. *Интеллектуальные роботы.* Роботы – это электромеханические устройства, предназначенные для автоматизации человеческого труда. Со времени создания первых роботов сменилось несколько поколений.

Роботы с жесткой схемой управления. Практически все современные промышленные роботы принадлежат к первому поколению. Фактически это программируемые манипуляторы.

Адаптивные роботы с сенсорными устройствами. Есть образцы таких роботов, но в промышленности они пока не используются.

Самоорганизующиеся или интеллектуальные, роботы. Это конечная цель развития робототехники. Основная проблема при создании интеллектуальных роботов – проблема машинного зрения.

7. *Обучение и самообучение.* Активно развивающаяся область искусственного интеллекта. Включает модели, методы и алгоритмы, ориентированные на автоматическое накопление знаний на основе анализа и обобщения данных. Включает обучение по примерам (или индуктивное), а также традиционные подходы распознавания образов.

Для комплексного анализа инцидентов на море используем *искусственную нейронную сеть (ИНС)* – систему, состоящую из множества простых вычислительных элементов, работающих параллельно и способную получать, хранить и использовать знания [155]. Результат работы ИНС определяется ее структурой, силой связей, а также видом вычислений, выполняемых каждым элементом. Структура ИНС задается разработчиком, и в целом стандартна, то есть содержит входной слой нейронов, скрытый слой (или слои) и выходы. Пример структуры ИНС будет приведен ниже. Сила связей между нейронами формируется в процессе обучения ИНС.

Обучение ИНС проведем на основе количественных и качественных данных о результатах силовых актов, приведенных в базе данных инцидентов на море и преобразованных в обучающую базу данных.

Рассмотрим процесс формирования данных для обучения ИНС, подробно изложенный в разнообразных источниках [154; 155]. Основные этапы формирования данных для обучения ИНС:

- определение входов и выходов ИНС;
- формирование таблицы (базы данных), содержащей значения входов и выходов ИНС;
- восстановления (аппроксимация) недостающих данных;
- очистка таблицы путем удаления строк, имеющих слишком большое число недостающих данных;
- кодирование данных в цифровой вид, пригодный для работы ИНС.

Значимые результаты по пиратству и терроризму и мер по борьбе с ними (выход ИНС) можно получить, дав ответ на вопросы:

– нападающим удалось подняться на борт?  
 – нападающие осуществили грабеж или похитили членов экипажа (пассажиров)?

– нападающие угнали судно?

В качестве входных данных для ИНС определены следующие:

- размеры судна;
- отношение числа судов к числу судов (лодок) нападающей стороны;
- применение стрелкового оружия нападающими;
- применение стрелкового оружия охраной судна;
- иные способы противодействия нападающим (маневры, увеличение скорости, включение слепящих прожекторов и т. п.);
- вмешательство военного (охранного) корабля.

Пример структуры ИНС, соответствующей определенному числу входов и выходов, представлен на рисунке 7.3.6.

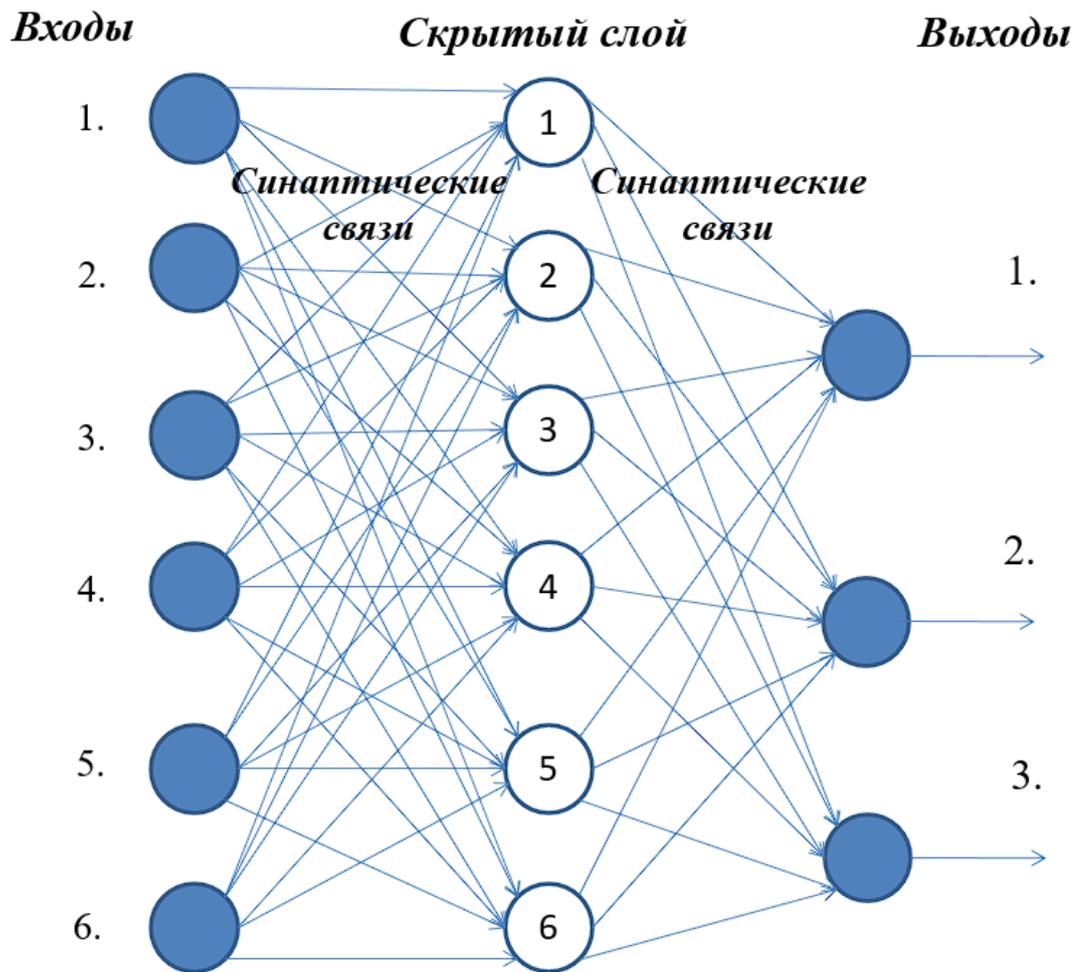


Рис. 7.3.6. Структура ИНС

После определения входных и выходных данных, на основе базы данных описаний силовых актов сформирована таблица, столбцы которой соответствуют всем входам и выходам, а строки всем инцидентам. Незначительное количество строк, имеющих неполные данные, было отброшено. Полученная база данных, фрагмент которой представлен в виде таблицы 7.3.4. содержит как цифровые значения, так и вербальные описания.

Таблица 7.3.4. Данные по входам и выходам ИНС

| № | Входы ИНС     |  |   |   |   |  | Выходы ИНС                           |  |                         |
|---|---------------|--|---|---|---|--|--------------------------------------|--|-------------------------|
|   | размеры судна | отношение числа судов к числу судов нападающей стороны | применение стрелкового оружия нападающими | применение стрелкового оружия охраной судна | иные способы противодействия нападающим | вмешательство военного (охранного) судна | нападающим удалось подняться на борт | нападающие осуществили грабеж или похитили | нападающие угнали судно |
| 1 | Танкер        | 0,5  | нет                                       | нет   | да                                      | нет                                      | нет                                  | нет  | нет                     |
| 2 | Яхта          | 1  | нет                                       | нет   | нет                                     | нет                                      | да                                   | да   | да                      |
| 3 | Сухогруз      | 1  | нет                                       | нет   | нет                                     | нет                                      | да                                   | да   | нет                     |

В ходе этапа кодирования таблица приводится к виду, пригодному для обучения ИНС. Вербальные данные преобразуются в цифровой вид, цифровые данные нормируются. Пример кодирования вербальных и цифровых данных (табл. 7.3.4) представлен в таблице 7.3.5.

Таблица 7.3.5. Результаты кодирования значений входов и выходов

| № | Входы ИНС     |  |   |   |   |  | Выходы ИНС                           |  |                         |
|---|---------------|--|---|---|---|--|--------------------------------------|--|-------------------------|
|   | размеры судна | отношение числа судов к числу судов нападающей стороны | применение стрелкового оружия нападающими | применение стрелкового оружия охраной судна | иные способы противодействия нападающим | вмешательство военного (охранного) судна | нападающим удалось подняться на борт | нападающие осуществили грабеж или похитили | нападающие угнали судно |
| 1 | 1             | 0,5  | 0   | 0   | 1                                       | 0  | 0                                    | 0  | 0                       |
| 2 | 0,3           | 1  | 0   | 0   | 0                                       | 0  | 1                                    | 1  | 1                       |
| 3 | 0,8           | 1  | 0   | 0   | 0                                       | 0  | 1                                    | 1  | 0                       |

В ходе обучения изменяются весовые коэффициенты синаптических связей между нейронами. В рассмотренном примере ИНС обучается в соответствии с методом обратного распространения ошибок [154; 155]. Целью обучения ИНС явилось создание связей между входом и выходом таким образом, чтобы входные сигналы нужным образом преобразовывались в выходные.

Исследование обученной ИНС позволило сделать ряд выводов о влиянии входящих факторов на успешность действий пиратов [396]:

1. При увеличении числа судов нападающей стороны успешность их действий снижалась, что на первый взгляд представляется нелогичным, но более глубокий анализ показывает, что увеличение числа судов является демаскирующим фактором, отрицательно влияющим на успех. Пиратов своевременно обнаруживали и принимали разнообразные меры противодействия.

2. Также на первый взгляд представляется нелогичным, что при зафиксированном применении нападающими огнестрельного оружия успешность их действий была ниже, чем при прочих равных условиях. Более глубокий анализ показывает, что применение огнестрельного оружия являлось демаскирующим фактором. В некоторых случаях огнестрельное оружие применялось раздосадованными в безуспешности своего нападения пиратами.

3. Действия пиратов имели максимальную успешность, когда они незаметно подходили на одиночном судне.

4. При вмешательстве охранного военного или полицейского судна успех пиратов все равно возможен при бездействии экипажа судна.

5. Если судно имело небольшие размеры, то при проникновении нападающих на его борт вероятность успеха грабежа крайне велика, по сравнению с судами большего размера.

6. Успешность действий пиратов обратно пропорциональна размерам судна.

Таким образом, исследована простейшая (базовая) модель силового акта на море, учитывающая как количественные, так и качественные характеристики участников силового акта. Параметр превосходства нападающих оценен методом максимального правдоподобия по данным международной базы инцидентов на море.

Применение нейронной сети в комплексе с аналитической моделью для анализа силовых актов позволяет выявлять нетривиальные зависимости и готовить более обоснованные рекомендации экипажам судов и службам безопасности по защите от пиратских, террористических и разбойных актов.

Перспективным направлением исследований по борьбе с пиратством и морским терроризмом является разработка теоретико-игровых моделей. Сложность применения классических игр безопасности и патрулирования заключается в том, что охраняемые объекты (транспортные и иные суда) подвижны.

## **ГЛАВА 8. МОДЕЛИ ОХРАНЫ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГРАНИЦЫ**

В настоящей главе представлено краткое описание системы пограничных мер (предупредительных, охранно-контрольных и защитно-боевых), приведен обзор моделей обеспечения пограничной безопасности, рассмотрены модели и методики обоснования плотностей сил и средств, необходимых для надежной охраны границы, а также некоторые модели применения пограничных сил и средств.

### **8.1. Система пограничных мер и обзор моделей обеспечения пограничной безопасности**

*Пограничная безопасность* – это процесс и результат деятельности органов власти, государственных и общественных организаций, отдельных граждан, оказывающих влияние на уровень национальной безопасности на государственной границе и в пограничном пространстве. Пограничная безопасность обеспечивается посредством организации и реализации системы пограничных мер [294].

#### ***8.1.1. Система пограничных мер и задачи пограничной статистики***

Концептуальная схема пограничных мер показана на рис. 8.1.1 [294; 578]. Дадим краткую характеристику представленных на ней элементов.

*Пограничная профилактика* – это прямое и косвенное воздействие на приграничное население в целях привлечения граждан и организаций к защите и охране интересов государства в пограничном пространстве; выявления и устранения причин и условий, способствующих незаконной деятельности в пограничном пространстве; оказания воспитательного воздействия на лиц в целях недопущения ими правонарушений в пограничной сфере.

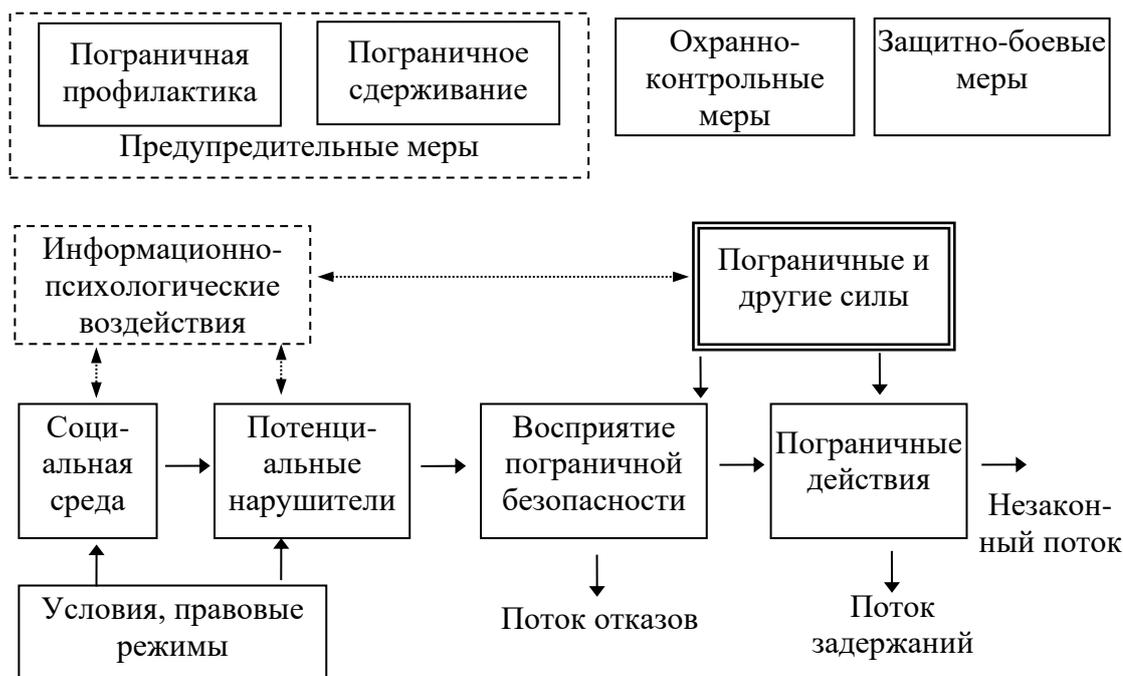


Рис. 8.1.1. Концептуальная схема пограничных мер

*Пограничное сдерживание* – это воздействия пограничных сил и средств на потенциальных нарушителей, направленные на их отказ от незаконной деятельности в связи с угрозой быть задержанными и наказанными.

Изучение данных пограничной статистики показало, что важнейшая цель охраны государственной границы СССР в послевоенные годы – недопущение нарушений границы и пограничного режима, – решалась в основном за счет предупредительных (профилактических и сдерживающих) действий [109]. В США после 2001 г. в качестве основного критерия рекомендуется применять «оптимальное сдерживание» – уровень охраны границы, при котором применение большего количества пограничных агентов и ресурсов пограничного патруля не дают значительного выигрыша в количестве задержанных нарушителей [466].

*Охранно-контрольные (пограничная служба и пограничный поиск) и защитно-боевые (специальные действия, боевые действия, оперативно-боевые мероприятия) меры* направлены на поддержание правовых режимов в пограничном пространстве и нейтрализацию субъектов опасности.

Важнейшей проблемой любой деятельности является целеполагание и определение критериев и показателей деятельности. К критериям пограничной безопасности (и набору показателей эффективности охраны границы) предъявляются следующие требования [578]:

– *обоснованность*: обеспечивается корректным и полным описанием системы пограничных мер;

– *надежность*: показатели должны быть легко интерпретируемыми и неманипулируемыми<sup>1</sup>;

– *полезность*: показатели являются управляемыми;

– *общность*: набор основных критериев и показателей должен применяться несколькими ведомствами, для всех участков границы (в пограничном пространстве) и для всех видов транспорта.

Многими исследователями отмечается, что пограничная безопасность является сложной системной проблемой и нельзя рассматривать деятельность пограничных сил (ведомств) изолированно, в отрыве от общей системы обеспечения национальной безопасности [392; 578].

Г. Уиллис и др. приводят примеры важности системного подхода к обеспечению пограничной безопасности. В частности, усилия по обеспечению безопасности границ могут значительно повысить издержки и риски для контрабандистов, возможно, снижая стимулы для незаконной торговли наркотиками. Однако эти усилия не будут полностью эффективными, если другие ведомства не внесут свой вклад в сокращение числа нелегальных потребителей наркотиков и установление предсказуемых и строгих приговоров для задержанных контрабандистов. Этот подход может быть применен и по отношению к другим проблемам (терроризм, предотвращение нелегальной миграции и другой трансграничной преступной деятельности) [578].

Обоснование критериев и показателей эффективности пограничной безопасности (безопасности границ) и пограничной деятельности является предметом теории пограничной безопасности [294] и пограничной статистики [109; 466; 523; 544; 547].

*Пограничная статистика* – это отрасль социальной статистики и учения о пограничной безопасности, изучающая количественную сторону явлений на государственной границе, в пограничном пространстве (на приграничных территориях), в сопредельных странах, возможностей и результатов деятельности пограничных и других сил в неразрывной связи с их качественной стороной [294].

Основными задачами пограничной статистики являются [109]:

1) анализ данных, характеризующих возможности и намерения потенциальных нарушителей правовых режимов в пограничном пространстве, а также трансграничных потоков;

---

<sup>1</sup> Манипулирование (англ. manipulation – уловка, махинация), использование кого-либо в своих целях без его ведома [58]. В теории управления организационными системами под манипулированием понимается целенаправленное искажение субъектами сообщаемой информации с целью обеспечения принятия более благоприятных для них решений.

- 2) анализ возможностей пограничных сил и средств;
- 3) анализ результатов оперативно-служебной и служебно-боевой деятельности пограничных сил (ведомств);
- 4) анализ данных о социальных процессах в пограничном пространстве и их влиянии на пограничную деятельность и состояние пограничной безопасности;
- 5) исследование статистических данных в интересах развития теории пограничной деятельности, разработки оперативно-тактических нормативов, подготовки и ведения оперативно-служебных и служебно-боевых действий, а также для целей пограничных научных исследований;
- б) информирование органов власти и общества о состоянии пограничной безопасности.

Дадим краткую характеристику некоторым подходам к решению задач пограничной статистики.

Б. Робертс, Э. Олден и Дж. Уитли в работе «Managing Illegal Immigration to the United States: How Effective Is Enforcement?» отмечают, что несмотря на принимаемые правительством США меры (увеличение бюджета и численности пограничной охраны, строительство на границе заграждений, регулярные публикации о количестве задержаний на границе), американское общество скептически относится к эффективности иммиграционного контроля. Выделяя значительные средства на охрану границы, правительство требует от министерства внутренней безопасности оценить эффективность деятельности и ответить на четыре вопроса [544; 548]:

- 1) Сколько нелегальных иммигрантов въезжает в страну вне пунктов пропуска?
- 2) Сколько нелегальных иммигрантов въезжает через пункты пропуска?
- 3) Сколько временных иммигрантов просрочили свои визы?
- 4) Сколько нелегальных иммигрантов проживает в США?

Рассмотрим известные статистические подходы для оценки количества лиц, нарушивших границу, не будучи обнаруженными и задержанными [412; 548].

Одним из основных показателей служебной деятельности пограничных ведомств считается количество задержанных нарушителей и количество прорывов (зафиксированных, но не задержанных нарушителей). Однако возможности пограничных сил в разных регионах существенно меняются и названных показателей недостаточно для объективной оценки эффективности охраны границы.

1. **Модель на основе анализа повторных задержаний.** Предположения: 1) все нелегальные иммигранты, задержанные на границе и депортированные, продолжают попытки въезда в США, пока не добьются успеха; 2) вероятность задержания не меняется при повторных задержаниях. Если эти предположения верны, то вероятность задержания равна:

$$P_z = \frac{m_r}{n_z}, \quad (8.1.1)$$

где:  $m_r$  – количество задержаний рецидивистов (лиц, повторно задержанных),  $n_z$  – общее количество задержаний. Тогда количество не обнаруженных и не задержанных нарушителей равно:

$$N_0 = \frac{n_z}{P_z}(1 - P_z). \quad (8.1.2)$$

Несмотря на то, что повторные задержания фиксируются и идентифицируются точно (у задержанных снимаются отпечатки пальцев), данная модель имеет и недостатки. Во-первых, многие лица отказываются от дальнейших попыток нарушения границы после первого или второго задержания. Во-вторых, при последующих попытках мигранты могут воспользоваться услугами опытных контрабандистов, что снизит вероятность их задержания при следующих попытках. Вероятность задержания также может быть разной в зависимости от физико-географических условий, времени суток и т. д.

2. **Оценка эффективности охраны границы на основе опросов.** Используется два типа опросов: 1) Мексиканский миграционный проект (ММР, Принстонский университет, проводится с 1965 г.) и 2) Мексиканская программа полевых исследований и обучения миграции (ММФРР, Калифорнийский университет, проводится с 2005 г.).

ММР использует полевые этнографические исследования домохозяйств в отдельных общинах по всей Мексике (объем выборки составляет от 600 до 1000 домохозяйств). Затем исследователи проводят интервью в США с нелегальными мигрантами из общин, отобранных в Мексике.

ММФРР – аналогичный опрос, который собирает информацию от домохозяйств (700-1000 респондентов) в трех общинах в Мексике с высоким уровнем эмиграции и в общинах южной Калифорнии, где такие мигранты часто оседают.

По результатам опросов выполняются оценки вероятности задержания мигрантов на границе. Поскольку объемы выборки невелики, полученные результаты не являются репрезентативными для всех лиц, незаконно пересекающих границу.

3. **Оценка сдерживания на основе наблюдений пограничных агентов.** С середины 2000-х гг. Таможенная и пограничная служба США систематичес-

ки фиксирует факты обнаружения нарушителей, а также факты их отказа от попытки нарушения границы. Основное достоинство метода наблюдений заключается в том, что он основан на реальной пограничной деятельности в режиме реального времени. Теоретически, если бы вся граница с Мексикой круглосуточно контролировалась, то пограничная служба имела бы полную картину того, сколько лиц пытались пересечь границу и сколько из них было задержано.

Недостатки метода. Первый: не все участки границы оборудованы системами наблюдения и фиксации нарушений. Второй: информация с датчиков и систем наблюдения не связана и не автоматизирована. В результате существует проблема двойного учета попыток нарушений, что приводит к переоценке фактора сдерживания.

Мигранты могут незаконно пересекать границу в *пунктах пропуска* следующими способами: 1) используя поддельные документы или документы других лиц, 2) прячась в транспортных средствах или в транспортных контейнерах.

**4. Выборочные проверки лиц в пунктах пропуска.** Программа COMPEX (Random Compliance Examination) формирует случайную выборку авиапассажиров и транспортных средств в пунктах пропуска, которые прошли установленные процедуры проверки и подвергает их более строгому «вторичному» досмотру (так называемая вторая линия контроля), который включает собеседования, дополнительные проверки документов, мобильных устройств, досмотр транспортных средств и в некоторых случаях снятие отпечатков пальцев. В качестве недостатка программы COMPEX исследователи отмечают невозможность использования нарушителями заимствованных или украденных документов.

Способы устранения перечисленных недостатков рассмотрены в [548]. Описание других методов оценки эффективности охраны границы и незаконных потоков можно найти в работах [109; 217; 385; 412; 547].

Таким образом, пограничная статистика предоставляет данные и методы для оценки эффективности пограничной деятельности. Перспективным направлением ее развития является разработка показателей и индексов в интересах межведомственного взаимодействия по обеспечению пограничной безопасности.

Данные и методы пограничной статистики также используются для оценки параметров аналитических моделей пограничной безопасности.

### 8.1.2. Обзор моделей обеспечения пограничной безопасности

Модели обеспечения пограничной безопасности обычно классифицируют по следующим основаниям:

- 1) комплексные и по направлениям пограничной деятельности (пограничная охрана, береговая охрана и пограничный контроль);
- 2) по типам управления пограничной деятельностью (обоснование потребных сил и средств, применение существующих сил и средств);
- 3) по методам моделирования.

По направлению пограничного контроля в опубликованных работах основное внимание уделяется проблемам биометрии (электронная граница), оценке рисков и анализу информации по пассажиропотоку [484; 506; 507].

Проблема обоснования потребных сил и средств для надежной охраны границы исследована в работах [393; 511; 576].

Работа Л. Вайна, И. Лю и А. Моцкина [576] интересна в нескольких отношениях.

Во-первых, она является первой работой, в которой на основе данных экономической и пограничной статистики разработана комплексная агрегированная модель обеспечения пограничной безопасности, состоящая из подмоделей: 1) задержания нарушителей на американо-мексиканской границе, 2) содержания нарушителей под стражей и их выдворения; 3) выявления нелегальных мигрантов на территории США.

Во-вторых, результаты расчетов и обработки данных пограничной статистики позволили сделать следующие выводы:

- деятельность пограничных агентов примерно в пять раз эффективнее деятельности инспекторов, отвечающих за поиск нелегальных мигрантов внутри страны;

- вероятность задержания террористов на американо-мексиканской границе по состоянию на 2006 г. не превышала 0,1;

- для эффективной борьбы с хорошо подготовленными нарушителями границы (террористами, контрабандистами, нелегальными мигрантами, пользующихся услугами проводников) необходимо руководствоваться прежде всего принципом непрерывности охраны границы, а в расчетах – применением игр безопасности Штакельберга.

В-третьих, в работе выполнена оценка параметров логит-модели дискретного выбора.

У потенциальных нарушителей границы имеется две альтернативы: остаться в стране проживания ( $i = 0$ ) и получать доход в размере  $u_0$  (полезность

законной деятельности) или пересечь границу США, став нелегальным мигрантом ( $i = 1$ ), и получать доход в размере  $u_1$  (за вычетом издержек, связанных с пересечением границы и др.). Вероятность выбора альтернатив равна [373; 576]:

$$s_i = \frac{e^{\lambda u_i}}{e^{\lambda u_0} + e^{\lambda u_1}}. \quad (8.1.3)$$

Для нелегальных мигрантов получена следующая оценка значения параметра логит-модели  $\lambda \approx 6,83 \cdot 10^{-5}$  1/\$. Найденному значению параметра  $\lambda$  трудно дать содержательную трактовку. Преобразуем выражение (8.1.3), введя безразмерный параметр  $\theta = \lambda u_1$ :

$$s_i = \frac{e^{\theta u_i / u_1}}{e^{\theta u_0 / u_1} + e^{\theta}}. \quad (8.1.4)$$

Из результатов расчетов [576] находим  $\theta \approx 2,7$ . Содержательно параметр  $\theta$  можно трактовать как степень знания нарушителями системы охраны границы и, как следствие, ожидаемого дохода от незаконной деятельности [383]. На рис. 8.1.2 показана зависимость вероятности отказа от незаконной деятельности  $s_0$  от полезности незаконной деятельности  $u_1$  (при  $u_0 = 500$ ) для трех значений параметра  $\theta$  (0,25; 2,7 и 15).

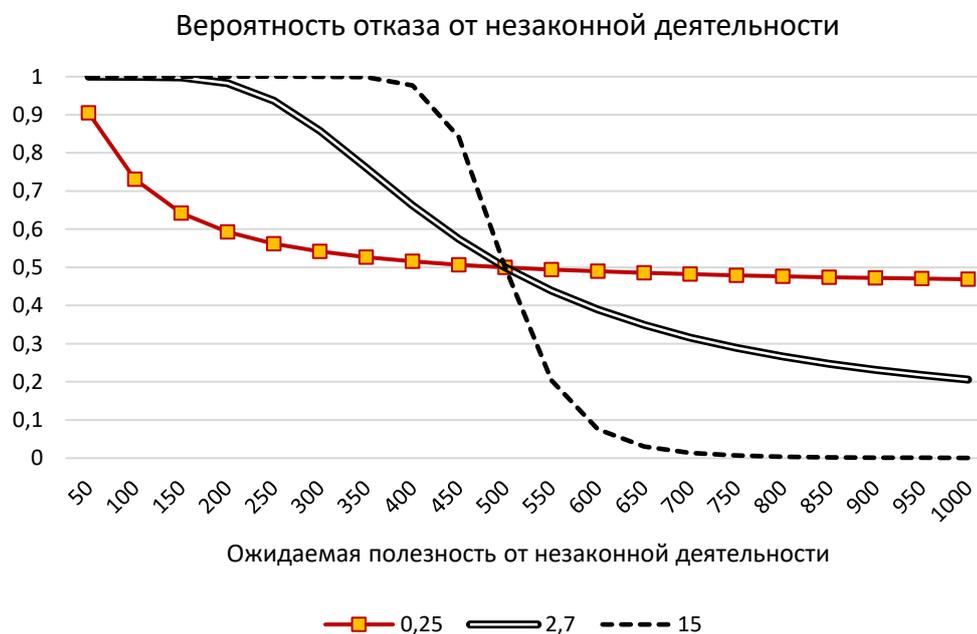


Рис. 8.1.2. Зависимость вероятности отказа от незаконной деятельности от ее полезности

За счет преобразования выражения (8.1.3) внесена систематическая ошибка в вычисления при значениях  $u_1$  близких к нулю (много меньших  $u_0$ ) и малых значениях  $\theta$ .

Малоисследованным остается вопрос об оценке параметра  $\theta$  для нарушителей с неэкономическими мотивами (террористы, диверсанты и т. д.). Можно предложить вместо  $u_0$  использовать  $\pi_0 = 0,5$ , а вместо  $u_1$  – вероятность их задержания (нейтрализации)  $\pi_1$ . В качестве недостатка модели (8.1.3) отметим тот факт, что свойства альтернатив представлены скаляром, а не вектором. Субъект, выбирая альтернативы, может учитывать как экономические выгоды и издержки, так и риски для здоровья, затраты времени и т. д.

Большинство работ в области охраны границы посвящены оптимальному применению имеющихся пограничных сил и средств (табл. 8.1.1).

Таблица 8.1.1. Некоторые работы в области моделирования охраны границы и исключительной экономической зоны

| Работы   | Их краткая характеристика  |
|--|--|
| «PROTECT: A deployed game theoretic system to protect the ports of the United States», 2012 [557]  | Теоретико-игровая модель (игра безопасности Штакельберга с ограниченной рациональностью игроков), предназначенная для планирования патрулирования катерами береговой охраны США в интересах обеспечения безопасности побережий, портов и внутренних водных путей |
| «Robust Protection of Fisheries with COMPASS», 2014 [472]<br>«When Security Games Go Green: Designing Defender Strategies to Prevent Poaching and Illegal Fishing», 2015 [457] | Применение игры безопасности Штакельберга в интересах охраны морских биоресурсов береговой охраной США   |
| «A Reinforcement Learning Approach to Tackle Illegal, Unreported and Unregulated Fishing», 2017 [402]  | Применение машинного обучения (Reinforcement Learning – обучение с подкреплением) для решения игры «Преследователь-убегающий» в интересах борьбы с незаконным, несообщаемым и нерегулируемым промыслом в исключительной экономической зоне                       |
| «Analytic model of border control», 1970 [554]; «Border security: a conceptual model of complexity», 2013 [562]  | Применение методов системной динамики (дифференциальных уравнений) для описания процессов защиты и охраны границы  |
| «Defending Critical Infrastructure», 2006 [427]  | Расширение иерархической модели «защитник-атакующий» до трех уровней (защитник-атакующий-защитник) и ее иллюстрация на примерах защиты от террористических атак критической инфраструктуры и пограничного патрулирования   |
| «Patrolling a Border», 2016 [531]  | Рассмотрена игра патрулирования границы на линейном графе с дискретным временем, с одним патрулем и одним атакующим  |
| «Building Real Stackelberg Security Games for Border Patrols», 2017 [429]  | Применение игры безопасности Штакельберга для планирования расписаний несения службы пограничниками Чили в ночное время  |

| Работы  | Их краткая характеристика   |
|---|---|
| «Optimization of Base Location and Patrol Routes for Unmanned Aerial Vehicles in Border Intelligence, Surveillance and Reconnaissance», 2019 [515]<br>«A multi-UAV deployment method for border patrolling based on Stackelberg game», 2023 [510] | Исследована проблема совместной оптимизации местоположений базовых станций БПЛА и их маршрутов полета на китайско-вьетнамской границе (решается задача двоично-целочисленного программирования с применением эвристик). Во второй статье рассмотрена игра безопасности Штакельберга |
| «Resources Package Modelling Supporting Border Surveillance Operations», 2021 [435]   | В интересах совершенствования охраны границы Бразилии решается задача максимизации суммарного времени патрулирования важных участков границы при ограничениях на ресурсы (количества баз дислокации и пограничных патрулей) и время несения службы                                  |

Многие из моделей охраны границы и обеспечения пограничной безопасности реализованы в виде программного обеспечения и используются в служебной деятельности.

Опишем технологию внедрения математических моделей на примере работ [410; 557] и с точки зрения пользователя (подразделения береговой охраны). Математическая модель разрабатывалась университетскими исследователями по заказу береговой охраны США. Предварительно консалтинговая компания обследовала территорию морского порта и присвоила каждому объекту соответствующее значение его ценности (с учетом возможных экономических и людских потерь в случае успешной террористической атаки).

Регулярное общение разработчиков с представителями заказчика (руководителями, планировщиками и операторами) позволило переосмыслить постановку задачи на разработку модели и существующие способы действий подразделений береговой охраны.

По результатам повторной экспертизы задания представители береговой охраны разработали новую тактику, методы и процедуры охраны портов со стороны моря:

- вместо двух состояний (прикрыто и не прикрыто) предусмотрено выполнение нескольких наборов действий;
- с целью исключения необоснованного вмешательства в порядок действий экипажа катера при патрулировании принято решение планировать службу катеров не по объектам, а по районам патрулирования (один район мог прикрывать несколько объектов порта).

Разработчики модели в результате общения убедились в необходимости:

– работы с несколькими командами заказчика на разных уровнях иерархии управления;

– подготовки ответов на практические вопросы пользователей, которые не всегда напрямую связаны с содержанием исследовательских проблем.

В основу модели охраны порта положена игра безопасности Штакельберга. Атакующий наблюдает за смешанными стратегиями охраны и затем выбирает для атаки один из объектов порта.

Для генерации стратегий патрулирования построен граф  $(V, E)$ , где вершины  $V$  – это районы патрулирования, а ребра  $E$  – маршруты. Причем маршрут патрулирования должен завершаться в начальной вершине, где началось патрулирование. Пример расписания патрулирования и игровой матрицы представлен в табл. 8.1.2 (строки – стратегии защитника, столбцы – стратегии атакующего).

Таблица 8.1.2. Пример расписания патрулирования и игровой матрицы

| Расписание патруля                   | Объект 1  | Объект 2 | Объект 3 | Объект 4 |
|--------------------------------------|-----------|----------|----------|----------|
| $(1:k_1), (2:k_1), (1:k_1)$          | 50, -50   | 30, -30  | 15, -15  | -20, 20  |
| $(1:k_2), (2:k_1), (1:k_1)$          | 100, -100 | 60, -60  | 15, -15  | -20, 20  |
| $(1:k_1), (2:k_1), (1:k_2)$          | 100, -100 | 60, -60  | 15, -15  | -20, 20  |
| $(1:k_2), (2:k_1), (1:k_2)$          | 100, -100 | 60, -60  | 15, -15  | -20, 20  |
| $(1:k_1), (3:k_1), (2:k_1), (1:k_1)$ | 50, -50   | 30, -30  | 15, -15  | 10, -10  |
| $(1:k_1), (2:k_1), (3:k_1), (1:k_1)$ | 50, -50   | 30, -30  | 15, -15  | 10, -10  |

Элементы расписания  $(v: s)$ , где  $v$  – номер района патрулирования,  $s$  – способ патрулирования. У защитника в каждом районе возможны два способа ( $k_1$  и  $k_2$ ), причем действие  $k_2$  обеспечивает более высокую защиту объектов в районе (это может быть неподвижный некоторое время дозор и т. д.). В столбцах 2-4 таблицы записаны выигрыши защитника и атакующего.

Введем следующие обозначения:

$R_i^d$  – выигрыш защитника, если на  $i$ -й объект атакован и он входит в расписание патрулирования;

$P_i^d$  – штраф защитника, если на  $i$ -й объект атакован и он не входит в расписание патрулирования;

$R_i^a$  – выигрыш атакующего, если им  $i$ -й объект атакован и он не входит в расписание патрулирования;

$P_i^a$  – штраф атакующего, если им  $i$ -й объект атакован и он входит в расписание патрулирования;

$0 \leq A_{ij} \leq 1$  – степень прикрытия  $i$ -го объекта при  $j$ -й стратегии защитника;

$\alpha_i$  – вероятность выбора  $j$ -й стратегии защитником.

Элементы матрицы платежей в рассматриваемой теоретико-игровой модели вычисляются по формуле:

$$G_{ij}^d = A_{ij}R_i^d + (1 - A_{ij})P_i^d. \quad (8.1.5)$$

Например, первый объект прикрывается способом патрулирования  $k_1$  в 5-м расписании и  $A_{15} = 0,5$ . Если  $R_1^d = 150$  и  $P_1^d = -50$ , то  $G_{15}^d = 50$ . Для атакующего элементы матрицы  $G_{15}^a$  вычисляются аналогично.

В рассматриваемой игре количество стратегий велико, поэтому используются так называемые компактные стратегии защитника, получаемые в результате объединения эквивалентных расписаний и удаления их из доминируемых. По умолчанию полагается, что маршрут патрулирования завершается в начальной зоне. В таблице 8.1.3 показаны компактные стратегии после объединения эквивалентных расписаний.

Таблица 8.1.3. Пример компактного расписания патрулирования

| Компактные стратегии                       | Объект 1  | Объект 2 | Объект 3 | Объект 4 |
|--|-----------|----------|----------|----------|
| $\Gamma_1 = \{(1:k_1), (2:k_1)\}$          | 50, -50   | 30, -30  | 15, -15  | -20, 20  |
| $\Gamma_2 = \{(1:k_2), (2:k_1)\}$          | 100, -100 | 60, -60  | 15, -15  | -20, 20  |
| $\Gamma_3 = \{(1:k_1), (2:k_1), (3:k_1)\}$ | 50, -50   | 30, -30  | 15, -15  | 10, -10  |

Далее сравниваем стратегии  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ . Замечаем, что для любого объекта выигрыш защитника в стратегии  $\Gamma_2$  больше или равен его выигрышу в стратегии  $\Gamma_1$ . Иными словами, стратегия  $\Gamma_2$  доминирует стратегию  $\Gamma_1$ . Следовательно, стратегию  $\Gamma_1$  исключаем из набора стратегий.

Противник (атакующий) полагается ограниченно рациональным и выбирает для атаки  $i$ -й объект с вероятностью:

$$q_i = \frac{e^{\lambda G_i^a(x_i)}}{\sum_{j=1}^T e^{\lambda G_j^a(x_i)}}, \quad (8.1.6)$$

где:  $\lambda \geq 0$  – параметр стандартной логит-модели<sup>1</sup>;  $T$  – количество охраняемых объектов;  $G_i^a(x_i)$  – выигрыш противника от атаки  $i$ -го объекта;  $x_i$  – вероятность прикрытия  $i$ -го объекта защитником. При  $\lambda = 0$  атакующий не ведет наблюдение за системой охраны объектов и с равной вероятностью выбирает любой из них, при  $\lambda \rightarrow \infty$  у атакующего имеется полное знание действий защитника.

<sup>1</sup> Описание основных свойств логит-модели можно найти в работе [373].

Для нахождения оптимальных стратегий используется равновесие дискретного отклика (см. [145, с. 181-186]), т. е. решается следующая задача:

$$\max_{x, \alpha} \frac{\sum_{i=1}^T e^{\lambda R_i^a} e^{-\lambda(R_i^a - P_i^a)x_i} [(R_i^d - P_i^d)x_i + P_i^d]}{\sum_{i=1}^T e^{\lambda R_i^a} e^{-\lambda(R_i^a - P_i^a)x_i}}, \quad (8.1.7)$$

$$\sum_{j=1}^T \alpha_j = 1, \quad 0 \leq \alpha_j \leq 1, \quad x_i = \sum_{j=1}^T \alpha_j A_{ij}, \quad \forall i.$$

С помощью прикладной программы (установленной на отдельном компьютере, не подключенном в целях безопасности ни к какой сети) выполняется расчет смешанных стратегий и формируется расписание патрулирования в форме, удобной для конечных пользователей (табл. 8.1.4).

Таблица 8.1.4. Пример расписания патрулирования, формируемого в подразделении береговой охраны для одного патруля

| День | Время | Маршрут патрулирования  |
|------|-------|---|
| 1    | 15:00 | (1:A), (5:C), (6:A), (8:A), (9:B), (8:B), (6:A), (5:A), (1:A)               |
| 2    | 3:00  | (1:A), (5:A), (6:A), (8:A), (9:A), (8:A), (6:A), (5:C), (1:A), (2:A), (1:A) |
| 3    | 17:00 | (1:A), (2:C), (4:B), (2:A), (1:B), (2:B), (1:A)                             |
| 4    | 16:00 | (1:A), (2:B), (4:B), (2:A), (1:B)   |
| 5    | 18:00 | (1:A), (5:A), (6:A), (8:A), (9:B), (8:A), (6:A), (5:B), (1:A)               |

Во 2-м столбце таблицы указано время начала патрулирования, в 3-м – подробный маршрут патрулирования (зона и способ).

В целях тестирования программы береговая охрана сформировала специальную группу имитации действий атакующего, которая пыталась проникнуть на охраняемые объекты морского порта в г. Бостон до и после развертывания компьютерной программы. Результаты тестирования показали повышение эффективности применения подразделений береговой охраны.

Проблемы обеспечения пограничной безопасности, защиты и охраны границы имеют комплексный характер, зависят от геополитических, социальных, военных, технических и других факторов, в их решении участвуют несколько ведомств.

Рассмотрим модель типа Осипова-Ланчестера «Analytic model of border control» [554]. Пусть в момент времени  $t > 0$  количество  $N(t)$  диверсантов (террористов, повстанцев) в регионе (районе, на участке ответственности) равно их начальному количеству  $N_0 = N(0)$  плюс количество диверсантов  $S(t)$ , успешно преодолевших государственную границу, плюс количество

диверсантов  $R(t)$ , набранных из числа пособников, минус их количество  $K(t)$ , выбывшее по тем или иным причинам (рис. 8.1.3).

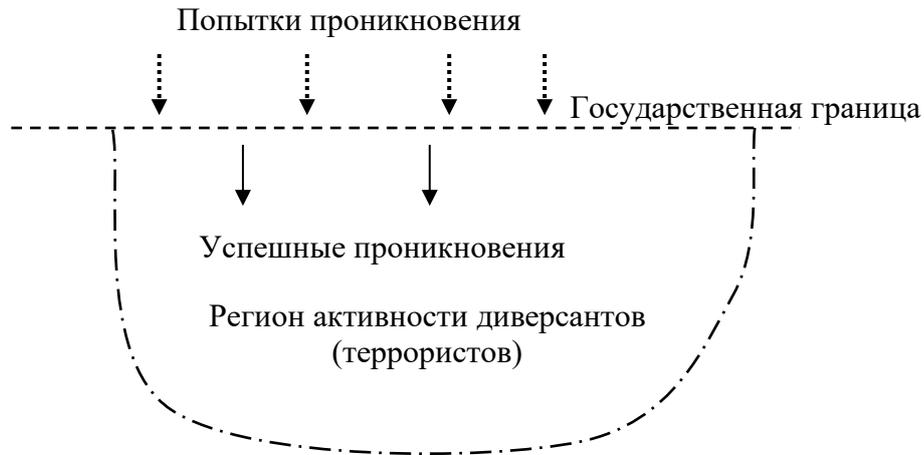


Рис. 8.1.3. Условная схема региона активности диверсионных групп

Ситуация в некоторый момент времени  $t > 0$  может быть описана следующими дифференциальными уравнениями [554]:

$$\dot{N}(t) = \dot{S}(t) + \dot{R}(t) - \dot{K}(t), \quad (8.1.8)$$

$$\dot{S}(t) = (1 - g)\dot{T}(t), \quad (8.1.9)$$

$$\dot{R}(t) = \rho N(t), \quad (8.1.10)$$

$$\dot{K}(t) = \gamma N(t), \quad (8.1.11)$$

где:  $\dot{N}(t) = dN/dt$ ,  $\dot{S}(t) = dS/dt$ ,  $\dot{R}(t) = dR/dt$ ,  $\dot{K}(t) = dK/dt$ ,  $\dot{T}(t) = dT/dt$ ;  $T(t)$  – количество диверсантов, пытавшихся нарушить границу к моменту времени  $t$ ;  $g$  – вероятность задержания диверсантов на границе;  $\rho$  – коэффициент, характеризующий эффективность рекрутинга новых диверсантов в регионе;  $\gamma$  – коэффициент, характеризующий эффективность нейтрализации диверсионно-террористической деятельности в регионе.

Вместо вероятности  $g$  задержания (нейтрализации) диверсантов целесообразно использовать другой показатель, характеризующий пограничную безопасность – вероятность  $E$  недопущения нарушений границы:  $E = d + (1-d)g$ , где  $d$  есть вероятность отказа противника от попытки нарушения границы в связи с чрезмерными рисками быть задержанными (нейтрализованными) [383].

Тогда формула (8.1.9) примет вид

$$\dot{S}(t) = (1 - d)(1 - g)\dot{T}(t). \quad (8.1.12)$$

Подставив выражения (8.1.10 – 8.1.12) в (8.1.8), получим:

$$\dot{N}(t) = (1 - d)(1 - g)\dot{T}(t) - (\gamma - \rho)N(t).$$

При постоянной интенсивности попыток нарушения границы  $dT/dt = \mu$  и интенсивности успешных проникновений  $dS/dt = \sigma = (1-d)(1-g)\mu$  имеем следующее уравнение:

$$\dot{N}(t) = (1-d)(1-g)\mu - (\gamma - \rho)N(t) = \sigma - (\gamma - \rho)N(t). \quad (8.1.13)$$

Его решение (количество диверсантов в регионе):

$$N(t) = \frac{\sigma}{\gamma - \rho} + \left( N_0 - \frac{\sigma}{\gamma - \rho} \right) e^{-(\gamma - \rho)t}. \quad (8.1.14)$$

Численность диверсантов в регионе постоянна при  $N_0 = \sigma/(\gamma - \rho)$ , т. е.  $\sigma = (\gamma - \rho)N_0$ . Если  $\sigma > (\gamma - \rho)N_0$ , то численность диверсантов растет, при  $\sigma < (\gamma - \rho)N_0$  – убывает. Проблема определения плотности прикрытия государственной границы, при которой количество диверсантов (диверсионно-разведывательных групп, террористов, повстанцев и т. д.) не будет расти, была актуальной в годы американо-вьетнамской войны 1964–1975 гг. (см. [554]), афганского конфликта 1979–1989 гг. Она не потеряла актуальности и в настоящее время.

Многие страны сталкиваются с проблемой нелегальной миграции. По оценкам более 10 млн. нелегальных мигрантов проживают в США, около 1 млн. – в Великобритании, около 3 млн. – в странах Европейского Союза [583]. В. Этьер в своей модели рассмотрел возможность наложения штрафов на работодателей, нанимающих нелегальных мигрантов. Эта мера в сочетании с усилением охраны границ приводит к значительному сокращению нелегальной миграции [455].

Ж. Язар и Р. Гиттер в работе «Border Games: A Game Theoretic Model of Undocumented Immigration» предложили следующую формулировку теоретико-игровой модели миграции [583].

Пусть существует две страны: источник и потребитель нелегальных мигрантов. Считается, что мигрирующие работники являются относительно малокавалифицированными. Полагается, что в стране – назначении существует высокий спрос на неквалифицированную рабочую силу и более высокий уровень оплаты труда, чем в стране – источнике. Рассматриваются следующие игроки:

- фирмы страны-назначения, стремящиеся к увеличению нелегальной миграции для сохранения низкой зарплаты и имеющие возможности для лоббирования своих интересов;

- работники страны-назначения, стремящиеся к сокращению нелегальной миграции для поддержки своих относительно высоких зарплат;

– парламент страны-назначения, стремящийся уравновесить желания фирм в интересах своих избирателей;

– семьи страны-источника, распределяющие свои ресурсы между работой дома или в стране-назначении и сталкивающиеся с рисками быть задержанными при пересечении границы.

Авторами [583] найдены равновесия игры (Нэша и Байеса-Нэша) и отмечен недостаток модели – сосредоточенность только на экономических аспектах нелегальной миграции.

Итак, выше приведен краткий обзор работ в области моделирования пограничной безопасности, который показывает: во-первых, необходимость учета в комплексных моделях безопасности и обороноспособности вопросов, связанных с защитой и охраной государственной границы; во-вторых, возросший интерес исследователей к моделированию задач охраны государственной границы и защиты национальных интересов в пограничном пространстве, в-третьих, наиболее перспективными направлениями исследований являются задачи обоснования требуемых сил и средств для надежной охраны границы и задачи повышения эффективности применения существующих сил и средств.

## **8.2. Обоснование плотностей сил и средств, необходимых для надежной охраны границы**

В комплексных задачах обороноспособности, борьбы с терроризмом, диверсиями и нелегальной миграцией, обеспечения безопасности и защиты государственных границ требуется оценивать и прогнозировать возможности пограничных ведомств (сил) по недопущению нарушений границы.

Анализ отечественного и зарубежного опыта моделирования деятельности пограничных сил позволяет сформулировать принципы назначения требуемых уровней охраны границы и обоснования перспективного облика пограничных подразделений [294]:

1) Системный и комплексный подходы, прогнозирование национальной и пограничной безопасности, выявление уязвимостей в охране границы.

2) На основе анализа угроз формирование перечня ожидаемых категорий нарушителей границы, оценка рисков и возможностей нарушителей по прорыву границы и нанесению ущерба.

3) Недопущение нарушений границы реализуется двумя основными способами, допускающими количественную оценку: во-первых, созданием условий и рисков, вынуждающих потенциальных нарушителей отказываться от своих намерений (результат пограничного сдерживания), во-вторых, их задержанием (нейтрализацией) в случае попытки нарушения границы.

4) Разработка вариантов системы пограничных мер с учетом существующих и перспективных образцов вооружения, военной и специальной техники, сетцентрических технологий и автоматизированных систем.

5) Сочетание мобильных и стационарных сил и средств охраны, наличие резерва сил и средств.

6) Применение комплекса моделей (аналитических, имитационных) для оценки эффективности системы пограничных мер, оценка параметров моделей по результатам ОСД, подготовка и проведение полигонных и войсковых испытаний.

Положения военной науки, пограничной статистики и опыт служебно-боевых действий дают основания для назначения требуемых уровней охраны границы [393] (табл. 8.2.1).

Таблица 8.2.1. Требуемые уровни охраны границы

| Уровень охраны | Категория нарушителей, требуемая вероятность задержания (нейтрализации) |                                    |   |
|----------------|---|------------------------------------|---|
|                | 1. Невооруженные нарушители (без пособников)                            | 2. Контрабанда оружия (наркотиков) | 3. Диверсионные (террористические) группы |
| Высокий        | 0,5-0,7   | 0,6-0,8                            | 0,8-0,9                                   |
| Средний        | 0,3-0,5   | 0,4-0,6                            | 0,6-0,8                                   |
| Минимальный    | Меньше 0,3  | Меньше 0,4                         | Меньше 0,6                                |

Значения требуемой вероятности задержания (нейтрализации) нарушителей определяются двумя факторами:

- степенью опасности нарушителей для государства и общества (ожидаемым ущербом и его последствиями);
- возможностями пограничного сдерживания нарушителей с экономическими мотивами.

Из трех представленных в таблице категорий нарушителей первые две, как правило, имеют мотивы экономического характера (поиск лучших условий жизни, нарушения с хозяйственно-бытовыми целями, контрабанда и т. д.). Обоснование требуемых вероятностей их задержания выполняется с использованием моделей пограничного сдерживания.

Третья группа нарушителей является наиболее опасной по двум причинам: во-первых, эта группа несет угрозу жизни гражданам, представителям власти, общественным деятелям и малыми силами может нанести непоправимый ущерб; во-вторых, террористы и диверсанты являются хорошо подготовленными и мотивированными и их (или их организаторов) может остановить только угроза быть уничтоженными при попытке нарушения границы или на пути следования к объектам атак.

Поэтому для 3-й группы высокий уровень охраны означает высокую гарантию их уничтожения (нейтрализации) при попытке пересечения границы. А наличие дополнительных сил и средств министерства обороны, министерства внутренних дел и других организаций приведет почти гарантированно к срыву поставленной задачи.

На протяженных участках границы высокий уровень ее охраны потребует привлечения значительных сил и средств, что может оказаться неэффективным с точки зрения государства. Тогда может оказаться разумным назначить средний уровень охраны границы, при котором окажутся высокими возможности по своевременному обнаружению нарушителей и их последующему задержанию во взаимодействии с другими ведомствами.

Далее рассмотрим задачу обоснования требуемых вероятностей задержания нарушителей с экономическими мотивами.

### *8.2.1. Модели пограничного сдерживания*

В ряде государств пограничное сдерживание («оптимальное сдерживание», см. [466]) является основным критерием охраны границы и важнейшим принципом пограничной деятельности в силу следующих обстоятельств: во-первых, имеется хорошо разработанный научный аппарат по прямой и косвенной оценке сдерживания нарушителей (пограничная статистика, экономическая теория преступности, теория дискретного выбора и т. д.), во-вторых, эффективность пограничного сдерживания оценена по результатам служебной деятельности (границы СССР, граница США с Мексикой).

Рассмотрим обоснование требуемых вероятностей задержания нарушителей с экономическими мотивами (нелегальные мигранты, контрабандисты и т. д.). Полезность  $u_1$  незаконной деятельности таких нарушителей равна (при однократной попытке нарушения границы):

$$u_1 = B(p_z)(D - S) + (1 - B(p_z))D, \quad (8.2.1)$$

где:  $p_z$  – вероятность задержания нарушителей;  $B(\cdot)$  – функция представления нарушителей о вероятности их задержания (зависит от информации, по-

лучаемой нарушителями от пособников, из СМИ и социальных сетей, см. раздел 3.4);  $D$  – ожидаемая прибыль от незаконной деятельности;  $S$  – денежный эквивалент наказания (включая конфискацию имущества, судебные и другие издержки).

Содержательно модель (8.2.1) можно трактовать так: прибыль  $D$  от преступления – это сила, которая побуждает человека совершить правонарушение. Тяжесть  $S$  и неотвратимость  $p_z$  наказания – сила, удерживающая его от этого. Если полезность  $u_1$  незаконной деятельности положительна, правонарушение следует ожидать, иначе – нет.

Зная по каждой категории нарушителей с экономическими мотивами ожидаемые значения их прибыли  $D$  и наказания  $S$ , из выражения (8.2.1) и условия  $u_1 < 0$  можно найти требуемое значение представления о вероятности для сдерживания нарушителей:

$$B(p_z) > \frac{D}{S}. \quad (8.2.2)$$

**Пример 1.** Нарушитель планирует незаконно пересечь государственную границу с целью получения прибыли в размере  $D = 200.000$  руб. и через полгода незаконно пересечь границу в обратном направлении. Рассчитать требуемую вероятность его задержания, при которой ему окажется невыгодной незаконная деятельность. Полагается, что он осведомлен о действиях по охране границы (через пособников или лиц, уже незаконно пересекавших границу).

Решение. В условиях осведомленности нарушителей о системе охраны границы и при отсутствии целенаправленных информационных воздействий полагаем, что представление о вероятности задержания совпадает с этой вероятностью, т. е.  $B(p_z) = p_z$ .

В соответствии со статьей 322 УК РФ и сложившейся практикой наказания примем  $S = 250.000$  руб.

Нарушитель будет дважды нарушать границу ( $n = 2$ ). Для привлечения его к ответственности достаточно одного задержания, т. е. модель (8.2.1) будет иметь вид (условие пограничного сдерживания):

$$u_1 = (1 - (1 - p_z)^n)(D - S) + (1 - p_z)^n D < 0, \quad (8.2.3)$$

откуда находим:

$$(D - S) + (1 - p_z)^n S < 0, \quad p_z > 1 - \sqrt[n]{\frac{S - D}{S}} \approx 0,55.$$

Таким образом, в условиях примера для частичной реализации пограничного сдерживания конкретной категории нарушителей (их отказа от по-

пытках нарушения границы) достаточно обеспечить вероятность задержания нарушителей не ниже 0,55. Отметим, что если нарушители достигают своей цели при однократном нарушении границы ( $n = 1$ ), то потребуется обеспечить вероятность задержания не ниже 0,8:

$$p_z > 1 - \frac{S - D}{S} = 0,8.$$

Важно подчеркнуть, что при  $S < D$  (денежный эквивалент наказания меньше ожидаемой прибыли) пограничное сдерживание невозможно обеспечить при любых сколь угодно высоких затратах на охрану границы. Поэтому наряду с реализацией мер по охране границы необходимо вести мониторинг по ожидаемым доходам нарушителей и предпринимать меры по снижению их дохода и/или увеличению меры наказания.

Рассмотрим на примере *методику обоснования средних плотностей охраны границы, при которых реализуется сдерживание нарушителей с экономическими мотивами.*

*Шаг 1.* Уточнение (прогноз) сведений о массовых потенциальных нарушителях границы с экономическими мотивами. По каждой категории нарушителей оцениваются данные:

– степень знания нарушителями системы охраны границы  $\theta$  (при  $\theta \approx 3$  нарушители пользуются услугами проводников, при  $\theta \approx 2$  нарушители самостоятельно изучают систему охраны границы, при  $\theta \approx 4$  имеется организованная преступная группировка);

– ожидаемая прибыль  $D$  от незаконной деятельности (доход минус издержки);

– денежный эквивалент наказания  $S$ ;

– средний доход (зарплата) в регионе  $u_0$ ;

– количество  $n$  нарушений границы для реализации прибыли.

*Шаг 2.* Назначается вероятность  $s_0$ , при которой реализуется пограничное сдерживание (массовый отказ от попыток нарушений границы данной категорией лиц). Обычно полагается  $s_0 = 0,7-0,8$ .

Из модели бинарного выбора

$$s_0 = \frac{e^{\theta u_0 / u_1}}{e^{\theta u_0 / u_1} + e^{\theta}}$$

находим

$$u_1 = \frac{\theta u_0}{\theta + \ln s_0 - \ln(1 - s_0)}. \quad (8.2.4)$$

При  $\theta = 3$ ,  $s_0 = 0,75$ ,  $u_0 = 30.000$  руб. получим:  $u_1 \approx 21.959$  руб.

*Шаг 3.* Из выражения (при  $n = 1$  или  $n = 2$ )

$$u_1 = (1 - (1 - p_z)^n)(D - S) + (1 - p_z)^n D$$

находим требуемую вероятность задержания нарушителей.

Пусть  $n = 1$ ,  $D = 200.000$  руб.,  $S = 250.000$  руб. Тогда

$$p_z = \frac{D - u_1}{S} \approx \frac{200.000 - 21.959}{250.000} \approx 0,71.$$

*Шаг 4.* Зная категорию нарушителей, из таблицы 3.3.2 берем значение параметра  $\lambda$  и по формуле (3.3.2) находим требуемую плотность охраны границы:

$$X_r = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - P_z) \approx -\frac{1}{0,24} \ln(1 - 0,71) \approx 5,2 \text{ чел./км.}$$

*Шаг 5.* Повторяем вычисления для других значимых категорий нарушителей (текущих и прогнозных) и принимаем в качестве требуемой плотности охраны границы максимальную величину.

Отметим следующее.

Во-первых, выше рассчитана средняя плотность охраны границы в регионе. Для оптимального назначения плотностей охраны границы на конкретных участках ответственности необходимо использовать аналитические модели.

Во-вторых, данная методика в первом приближении может быть использована и для нарушителей с неэкономическими мотивами (вместо показателей полезности  $u_0$  и  $u_1$  следует взять вероятности  $\pi_0 = 0,5$  и  $P_z$ ) в логит-модели:

$$s_0 = \frac{e^{\theta\pi_0/p_z}}{e^{\theta\pi_0/p_z} + e^{\theta}}.$$

В комплексных моделях обеспечения безопасности и борьбы с терроризмом (см. [554]) может быть задано ожидаемое количество террористов (повстанцев, диверсантов)  $S$ , имеющих намерения пересечь границу. Положим, что террористы действуют малыми группами и независимо друг от друга. Тогда вероятность недопущения нарушения границы будет равна:

$$P_N = s_0 + (1 - s_0)p_z = \frac{e^{\theta\pi_0/p_z} + p_z e^{\theta}}{e^{\theta\pi_0/p_z} + e^{\theta}}, \quad (8.2.5)$$

а количество террористов, успешно пересекших границу

$$S_p = S(1 - P_N). \quad (8.2.6)$$

### 8.2.2. Обоснование требований к построению охраны границы

Концептуальная схема аналитического обоснования требований к построению охраны границы показана на рис. 8.2.1 [294].



Рис. 8.2.1. Концептуальная схема обоснования требований к построению охраны границы

Вероятность задержания нарушителей вычисляется по формуле:

$$P_z = P_{so}P_{mz}, \quad (8.2.7)$$

где:  $P_{so}$  – вероятность своевременного обнаружения нарушителей и качественных действий по сигналам тревог;  $P_{mz}$  – вероятность задержания (нейтрализации) нарушителей при условии их обнаружения.

При наличии аналитических дифференцируемых функций  $P_{so}(x)$  и  $P_{mz}(y)$ , где  $x$  и  $y$  – количество сил и средств, выделяемых для решения задач своевременного обнаружения нарушителей и их задержания, условие оптимального распределения между названными задачами имеет вид:

$$\frac{P'_{so}(x)}{P_{so}(x)} = \frac{P'_{mz}(y)}{P_{mz}(y)}.$$

Если вероятность  $P_z$  задана нормативно, и в частном случае, когда издержки на реализацию функций своевременного обнаружения нарушителей и их задержания примерно равны, то необходимо обеспечить следующие значения вероятностей  $P_{so}$  и  $P_{mz}$ :

$$P_{so} \approx P_{mz} \approx \sqrt{P_z}. \quad (8.2.8)$$

В таблице 8.2.2 показаны необходимые уровни вероятностей обнаружения и задержания обнаруженных нарушителей для обеспечения требуемой вероятности задержания.

Таблица 8.2.2. Необходимые уровни вероятностей

|   |      |      |      |      |      |      |      |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| Требуемая вероятность задержания                    | 0,9  | 0,8  | 0,7  | 0,6  | 0,5  | 0,4  | 0,3  |
| Необходимые уровни вероятностей $p_{so}$ и $p_{mz}$ | 0,95 | 0,89 | 0,84 | 0,77 | 0,71 | 0,63 | 0,55 |

Для получения точных результатов расчетов необходимо использовать данные о местности на участках ответственности и положении пограничных сил и средств, включая резервы.

Кратко опишем **методику расчета вероятности задержания нарушителей**.

*Шаг 1.* Расчет зон упреждения нарушителей резервами (заслонами) и пограничными нарядами (рис. 8.2.2).

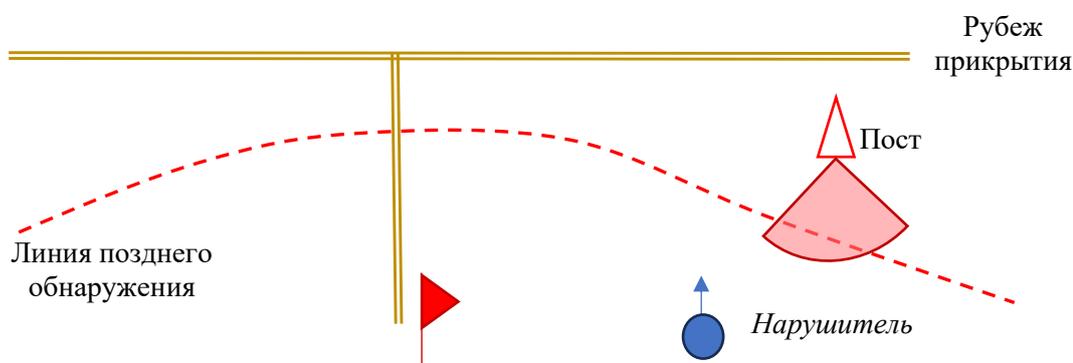


Рис. 8.2.2. Зоны упреждения нарушителей

Время  $t_y$  упреждения нарушителей рассчитывается по формуле:

$$t_y = t_{ng} - t_{zn}, \quad (8.2.9)$$

где:  $t_{ng}$  – время движения нарушителя с момента его обнаружения до выхода на рубеж (к границе, в тыл);  $t_{zn}$  – время движения заслона (резерва, погн) с учетом времени сбора).

Полагается, что нарушитель движется по кратчайшему проходимому маршруту в сторону границы или в наш тыл (к объекту интереса).

На рис. 8.2.2 показана линия позднего обнаружения (пунктирная линия) заслоном и зона упреждения нарядом (сектор). Если нарушитель будет обнаружен выше линии позднего обнаружения и вне зоны упреждения, то он не будет задержан. Т.е. вероятность его своевременного обнаружения равна нулю. Иначе вероятность своевременного обнаружения полагается равной вероятности  $p_o$  его обнаружения:

$$p_{so} = \begin{cases} p_o, & t_y \geq 0, \\ 0, & t_y < 0. \end{cases} \quad (8.2.10)$$

Расчеты показывают, что для обеспечения упреждения нарушителей необходимо выполнить минимально необходимые требования (табл. 8.2.3).

*Шаг 2.* Расчет вероятности приборного обнаружения. Вероятность обнаружения нарушителей рассчитывается как доля участка и времени суток, при которых возможно обнаружение нарушителей (пространственно-временная схема прикрытия средствами обнаружения, рис. 8.2.3).

Таблица 8.2.3. Требования по обеспечению упреждения нарушителей

| Требование   | Уровень охраны границы |               |
|--|------------------------|---------------|
|  | Средний                | Высокий       |
| Количество подготовленных рубежей  | Не менее двух          | Не менее трех |
| Наличие заграждений, воспрепятствующих использованию нарушителями транспортных средств | Желательно             | Обязательно   |
| Режим пограничной полосы   | Желательно             | Обязательно   |

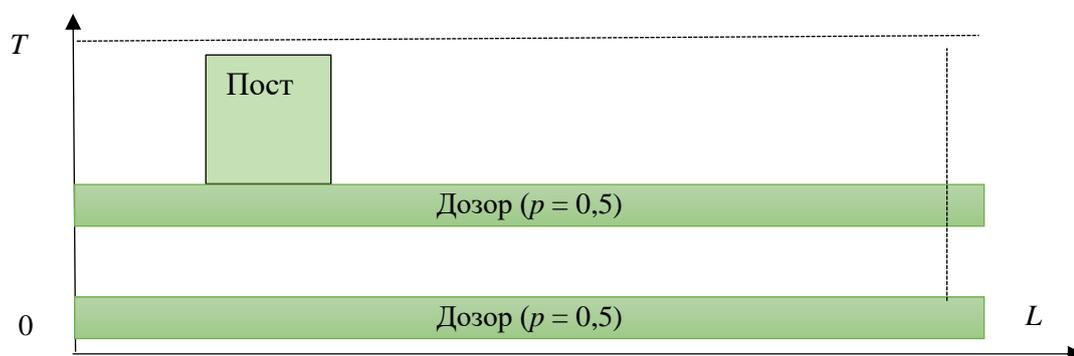


Рис. 8.2.3. Зона обнаружения нарушителей

Для высокого и среднего уровней охраны границы необходимо комплексное применение средств наблюдения (наземных и воздушных) и средств сигнализации, что позволит обнаруживать нарушителей в любых погодных условиях и на разных типах местности.

*Шаг 3* (учет сигналов ложных тревог). Под вероятностью обнаружения нарушителей понимается приборная вероятность обнаружения с учетом своевременных действий по сигналам тревог (см. раздел 6.2.2):

$$P_o = P_{np} P_{cmo}, \quad (8.2.11)$$

$$\frac{1}{P_0} = \begin{cases} 1 + \frac{\rho}{(\lambda_t - \mu)} (\lambda_t e^{-\mu(1-\rho)t_y} - \mu) & \text{при } \lambda_t \neq \mu, \\ 2 + \lambda_t t_y & \text{при } \lambda_t = \mu, \end{cases} \quad (8.2.12)$$

$$P_{cmo} = 1 - P_0 \rho e^{-\mu(1-\rho)t_y}, \quad \rho = \lambda_t / \mu,$$

где:  $P_{np}$  – приборная вероятность обнаружения (плотность прикрытия участка средствами обнаружения);  $P_{cmo}$  – вероятность своевременных и качественных действий по сигналам тревог;  $\lambda_t$  – интенсивность сигналов тревог (включая ложные);  $\mu$  – интенсивность обслуживания сигналов тревог.

Интенсивность обслуживания  $\mu$  вычисляется по формуле:

$$\mu = \begin{cases} \frac{1}{t_d}; & \text{1-й способ,} \\ \frac{1}{t_d + \Delta t}; & \text{2-й способ,} \end{cases} \quad (8.2.13)$$

где:  $t_d$  – среднее время сбора, выезда на участок, обнаружения признаков нарушения границы, непосредственно действий по задержанию нарушителей и возвращения;  $\Delta t \approx 12\text{--}15$  час. – время, ежедневно необходимое личному составу на сон, прием пищи, занятия, обслуживание техники и т. д.

При первом способе действий в подразделении назначается резерв личного состава, предназначенный для действий по сигналам тревог, причем час времени нахождения в резерве засчитывается как полчаса несения службы. При втором способе действий в резерв назначается весь свободный от службы личный состав.

*Шаг 4* (расчет условной вероятности задержания). Условная вероятность  $p_{mz}$  вычисляется по формуле:

$$p_{mz} = \frac{(\beta x)^\alpha}{(\beta x)^\alpha + y^\alpha}, \quad \beta = \sqrt[4]{\beta_s \beta_r \beta_w \beta_m}, \quad (8.2.14)$$

где:  $x$  – численность пограничников, участвующих в задержании (нейтрализации) нарушителей;  $y$  – численность нарушителей;  $\beta$  – параметр боевого превосходства пограничников над нарушителями;  $\alpha$  – параметр масштаба;  $\beta_s$ ,  $(\beta_r, \beta_w, \beta_m)$  – параметр превосходства над противником в согласованности действий (обнаружении, поражении и маневренности).

Параметр масштаба равен:

$\alpha = 0,5$  при отсутствии средств непрерывного сопровождения нарушителей и наведения на них нарядов и групп;

$\alpha = 1$  в противном случае.

Таким образом, рассмотрены модели и методики обоснования плотностей, обеспечивающих надежную охрану государственной границы. Актуальным направлением исследований является разработка моделей и методик формирования перспективного облика пограничных подразделений.

### 8.2.3. Структуры и функции пограничных подразделений

В работе [511] исследуется проблема построения эффективных структур Таможенной и пограничной службы США на трех уровнях: стратегическом (применение спутников для контроля границы), тактическом (высотные БПЛА

с большой продолжительностью полета) и операционном (наземные силы и средства). На операционном уровне используются квадрокоптеры, стационарные посты (заставы) и датчики. Для снижения нагрузки на личный состав FPV-дроны используются для реагирования по сигналам тревог (обнаружение нарушителей и по возможности их «отпугивание»).

Система мониторинга предназначена для обнаружения как нарушителей границы, так и военных целей и включает в себя тактические аэростаты, радиолокационные станции различных типов, камеры для дневного и ночного наблюдения, сейсмические и другие датчики.

Для решения задачи нахождения рациональных структур пограничных подразделений воспользуемся функциями пограничных сил и средств (табл. 8.2.4) [294; 386].

Таблица 8.2.4. Основные функции пограничных сил и средств

| Функции пограничных средств                                 | Пояснения, характеристика  |
|---|--|
| <i>1. Tактический пограничный цикл (пограничной службы)</i> |  |
| Информирующая функция                                       | Информирование субъектов о прохождении государственной границы, границах пограничной зоны (охраняемой полосы), правилах режима и т. д.   |
| Функция тактического сдерживания                            | Психологические воздействия на правонарушителей с целью отказа от противоправной деятельности или изменения способов действий (прожекторные станции, демонстративные действия и др.) |
| Заградительная функция                                      | Заградительные средства, вынуждающие субъектов спешиться, если они передвигаются на автомашине или резко замедляющие скорость передвижения   |
| Функция обнаружения   | Обнаружение фактов (признаков) нарушения режима  |
| Функция распознавания (выбора)                              | Подтверждение факта нарушения режима, минимизация сигналов ложных тревог   |
| Функция перемещения   | Перемещение пограничных групп и развертывание на рубежах (в районах)   |
| Функция наведения (преследования)                           | Получение своевременной информации о движении правонарушителя и передача ее группе реагирования  |
| Функция задержания  | Задержание (пресечение действий, нейтрализация) правонарушителей и проведение необходимых действий с ними  |
| Функция фиксации признаков правонарушения                   | Фиксация признаков, подтверждающих факт правонарушения   |
| Функция обеспечения собственной безопасности                | Обеспечение безопасности пограничных нарядов, подразделений, мест дислокации   |
| <i>2. Цикл поисковых действий</i>                           |  |
| Функция перемещения   | Перемещение пограничных групп и развертывание на рубежах (в районах)   |
| Функция поиска  | Сбор информации о правонарушителях, их вооружении, оперативной обстановке в районе операции  |

|  |   |
|--|---|
| Функции пограничных средств                  | Пояснения, характеристика   |
| Функция информационного управления           | Информирование населения о режиме операции, об угрозах, ведение переговоров                     |
| Функция блокирования                         | Изоляция определенного района, обеспечение режима операции, организация дорожного движения      |
| Функция наведения (преследования)            | Получение своевременной информации о движении правонарушителя и передача ее группе реагирования |
| Функция задержания (захвата, вытеснения)     | Задержание (пресечение действий, нейтрализация, вытеснение) правонарушителей                    |
| Функция фильтрации                           | Проверка задержанных лиц  |
| Функция фиксации признаков правонарушения    | Фиксация признаков, подтверждающих факт правонарушения  |
| Функция обеспечения собственной безопасности | Обеспечение безопасности сотрудников, подразделений и других лиц                                |

Заградительная функция может быть обеспечена как искусственно (обустройство рубежа основных инженерных сооружений), так и иметь естественное происхождение (высокий берег реки, естественные препятствия, глубокий снежный покров в зимнее время и т. д.).

Отметим, что существующие средства охраны границы способны реализовать одну или несколько функций. Например, традиционная контрольно-следовая полоса (КСП) реализует функцию фиксации признаков и информирующую функцию. Средства наблюдения, входящие в состав автоматизированных комплексов, реализуют функции обнаружения, наведения и фиксации признаков (электронная КСП).

Оценка эффективности охранно-контрольных мер, формирование облика пограничных действий и обоснование мероприятий по оборудованию границы выполняются с использованием критериев, основанных на принципах охраны границы:

- комплексность – количество функций, реализуемых оцениваемым пограничным средством;
- непрерывность охраны – коэффициент непрерывности использования пограничного средства по направлениям и времени;
- мобильность – скорость перемещения и маневрирования пограничного средства;
- непрерывность (по функциям и задачам) – коэффициент равномерности распределения пограничных средств по функциям.

Получили многокритериальную задачу оптимизации. Для ее решения возможно использование границы и рангов<sup>1</sup> Парето [386].

Таким образом, применение положений теории пограничной безопасности (система пограничных мер, функции пограничных сил и средств) и агрегированных функций, полученных на основе обработки данных пограничной статистики, позволяет создать интуитивно понятные и простые модели и методики, предназначенные для обоснования плотностей сил и средств, необходимых для надежной охраны государственной границы, а также для формирования перспективного облика пограничных подразделений.

Создание более полных и точных моделей, методик и специального математического обеспечения требует учета возможностей и основных характеристик пограничных сил и средств. Решению этого вопроса посвящен следующий раздел главы.

### **8.3. Модели применения пограничных сил и средств**

В настоящем разделе рассмотрены задачи применения в охране границы беспилотных летательных аппаратов, светотехнических средств и средств обнаружения (датчиков), а также подходы к комплексированию моделей охраны границы.

#### ***8.3.1. Модели применения беспилотных летательных аппаратов в охране границы***

**Модель применения БПЛА для своевременного обнаружения признаков нарушения границы на контрольно-следовой полосе.** При охране протяженных рубежей часто возникает следующая задача (рис. 8.3.1). Имеется контролируемая охраной зона глубиной  $D$ , на которой оборудована контрольно-следовая полоса (КСП). Нарушитель пересекает зону за время  $t_n$ . Резерв охраны прибывает к месту возможного выхода из зоны не позднее времени  $t_r$ .

Время упреждения определяется  $t_y = t_n - t_r$ . При нулевом или отрицательном времени  $t_y$  соответствующие участки считаются не упреждаемыми,

---

<sup>1</sup> Средства 1-го ранга принадлежат границе Парето. После их удаления повторно вычисляется граница Парето и определяются средства 2-го ранга и т. д.

дозор при любом способе его использования не обеспечивает своевременное обнаружение нарушителей.

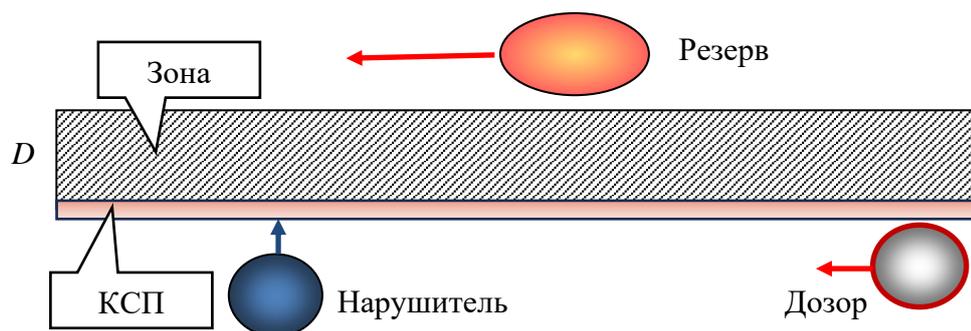


Рис. 8.3.1. Действия нарушителя и охраны

В зависимости от вида дозора (наземный, воздушный) он имеет задачу обнаружения нарушителя и/или признаков нарушения. Под *своевременным обнаружением* нарушителя (его признаков) будем понимать их обнаружение не позднее времени  $t_y$  с момента пересечения нарушителем контролируемой зоны.

Примем следующие предположения и допущения:

1) Нарушители не кооперируются, действуют поодиночке или единой небольшой группой.

2) Считаем, что дозор способен обнаружить нарушителей на дальности, не меньшей, чем дальность обнаружения нарушителей дозором. Полагаем, что продолжительности циклов действий нарушителей и охраны примерно одинаковы, что дает основания считать, что стороны принимают решения одновременно.

3) Цель охраны (игрока  $A$ ) – своевременно обнаружить нарушителя или признаки нарушения на КСП, создав тем самым условия для их задержания, цель подготовленных нарушителей (игрока  $B$ ) – преодолеть контролируемый рубеж (зону).

Подобные задачи традиционно относятся к классу игр патрулирования.

Сутки ( $T = 24$  часа) разобьем на  $k$  интервалов:  $k = \lceil T/t_y \rceil$ , где  $\lceil \dots \rceil$  есть знак округления в большую сторону. Предполагается, что на отдельном временном интервале конкретный участок проверяется не более чем одним дозором. Вектор числа дозоров:

$$x = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_k) \in X,$$

где:  $x_i = \{0, 1\}$  – число дозоров в  $i$ -м интервале времени.

На вектор  $x$  наложено ограничение:

$$\sum_{i=1}^k x_i = n, \quad (8.3.1)$$

где:  $n < k$  – число дозоров, высылаемых на участок в течение периода  $T$ .

Если число нарушителей  $m$  неизвестно, то можно положить  $m = 1$  (ожидаем действий нарушителей и принимаем соответствующие меры).

Вектор числа подготовленных нарушителей границы:

$$y = (y_1, \dots, y_i, \dots, y_k) \in Y,$$

где:  $y_i = \{0, 1\}$  – число нарушителей в  $i$ -м интервале времени.

На вектор  $y$  наложено ограничение:

$$\sum_{i=1}^k y_i = m. \quad (8.3.2)$$

Своевременное обнаружение признаков нарушения возможно:

– при действиях нарушителя и дозора на одном временном интервале в половине случаев дозор пройдет по участку позже нарушителя и своевременно обнаружит его признаки с вероятностью  $\rho_i$ ;

– при действиях нарушителя на предыдущем временном интервале ( $i-1$ ) в половине случаев дозор пройдет по участку не позже времени  $t_y$  и своевременно обнаружит его признаки с вероятностью  $\rho_i$ .

Выигрыш стороны  $A$  – математическое ожидание числа нарушителей, признаки которых будут своевременно обнаружены первым проходящим дозором:

$$H(x, y) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \rho_i x_i y_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \rho_i x_i y_{i-1} \approx \sum_{i=1}^k \rho_i x_i y_i, \quad (8.3.3)$$

где  $\rho_i$  есть вероятность обнаружения признаков нарушения дозором на  $i$ -м интервале времени. Предполагается, что  $y_0 = y_k$  и на отдельном небольшом интервале времени плотности движения нарушителей и дозоров подчиняются закону равной вероятности.

Доказано, что оптимальная смешанная стратегия сторон  $A$  ( $p_1, p_2$  – вероятности высылки дозоров преимущественно ночью и днем) и  $B$  ( $q_1, q_2$  – вероятности выбора нарушителем, соответственно, темного или светлого времени суток) равна [381]:

$$p_1 = q_1 = \frac{\rho_2 T_1}{\rho_1 T_2 + \rho_2 T_1}, \quad p_2 = q_2 = 1 - p_1, \quad (8.3.4)$$

значение игры (оптимальная вероятность своевременного обнаружения признаков нарушения границы):

$$v = \frac{nt_y \rho_1 \rho_2}{\rho_1 T_2 + \rho_2 T_1}, \quad (8.3.5)$$

где:  $T_1$  ( $T_2$ ) – продолжительность темного (светлого) времени суток;  $\rho_1$  ( $\rho_2$ ) – вероятность обнаружения признаков нарушений дозором ночью (днем).

Оптимальное распределение дозоров по времени суток (выражение 8.3.4) не зависит от времени упреждения и количества средств охраны, а зависит только от продолжительности темного (светлого) времени суток и возможностей дозоров по обнаружению признаков днем и ночью.

**Пример.** Имеется  $n = 5$  вылетов БПЛА в сутки. Продолжительность ночи равна  $T_1 = 10$  час. Ночью признаки нарушения обнаруживаются с вероятностью  $\rho_1 = 0,3$ , днем –  $\rho_2 = 0,9$ . Время упреждения нарушителей равна  $t_y = 2$  час. Найти оптимальные стратегии сторон и вероятность своевременного обнаружения нарушителей.

По формулам (8.3.4) и (8.3.5) находим:

$$p_1 = q_1 = \frac{\rho_2 T_1}{\rho_1 T_2 + \rho_2 T_1} \approx 0,68, \quad p_2 = q_2 \approx 0,32, \quad v = \frac{nt_y \rho_1 \rho_2}{\rho_1 T_2 + \rho_2 T_1} \approx 0,2.$$

Таким образом, нарушители границы в 68 случаях из ста будут выбирать ночное время суток. Соответственно, пограничному начальнику целесообразно выделить 68% летного ресурса БПЛА на ночное время суток. При этом вероятность своевременного обнаружения признаков нарушения границы будет равна 0,2.

**Задача применения БПЛА для обнаружения нарушителей границы.** Для решения названной задачи С. Лэй и др. в статье [510] применили игру безопасности Штакельберга. Протяженный участок границы разбивается на зоны. На рис. 8.3.2 показаны маршруты патрулирования в дискретные моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ .

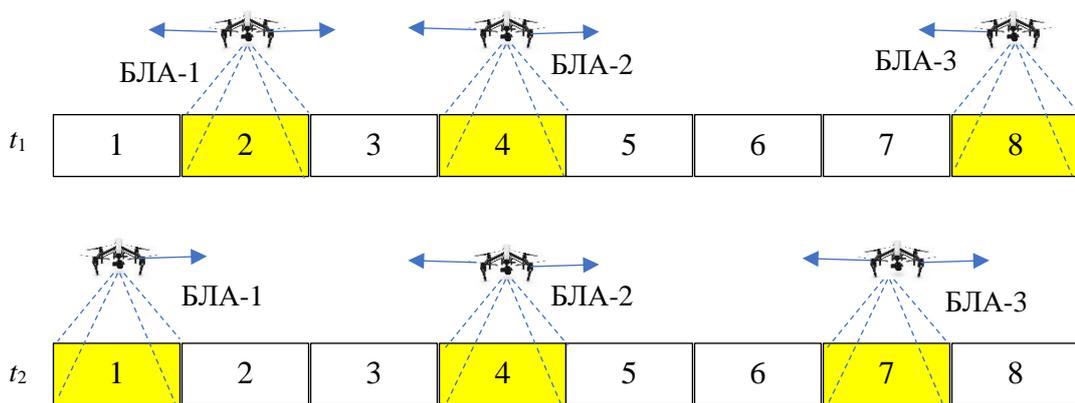


Рис. 8.3.2. Возможные маршруты патрулирования зон тремя БПЛА

Во время патрулирования БПЛА полностью контролирует одну зону. Участок границы состоит из  $r$  зон,  $R = \{1, 2, \dots, r\}$ . Для каждой зоны  $i \in R$ , введем множество смежных зон  $N(i)$ , причем  $i \in N(i)$ . Продолжительность  $t$

патрулирования дискретно и принадлежит множеству  $t = \{t_1, t_2, \dots, t_T\}$ . Для формирования стратегий игроков строится ориентированный граф  $G = (V, E)$ , см. пример на рис. 8.3.3.

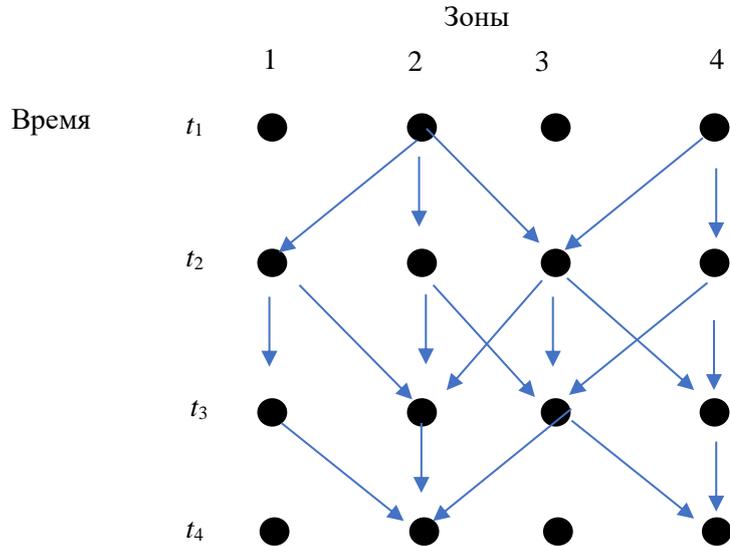


Рис. 8.3.3. Пример графа патрулирования БПЛА

Всего имеется  $m$  однотипных БПЛА,  $W = \{1, 2, \dots, m\}$ . Защитник определяет маршрут патрулирования для каждого из них (с учетом заданного множества смежных зон  $N(i)$ ). Пусть  $R_d \subseteq R$  – зоны, с которых БПЛА начинает патрулирование. На рисунке  $R_d = \{2, 4\}$ . Обозначим  $d_w$  – маршрут патрулирования  $w$ -го БПЛА, чистую стратегию защитника –  $d = (d_w)_{w \in W}$ , смешанную стратегию –  $x = (x_d)_{d \in D}$ , где  $0 \leq x_d \leq 1$  – вероятность выбора чистой стратегии  $d$ ,  $\sum_{d=1}^{|D|} x_d = 1$ ,  $D$  – множество маршрутов патрулирования. Маршрут патрулирования представляется в виде множества  $d_w = \{(S, (j, t_k), E), j \in R, k \in \{1, \dots, T\}\}$ , где  $S$  – начальная вершина,  $E$  – конечная вершина.

Чистая стратегия нарушителя заключается в выборе зоны и времени ее пересечения  $a = \langle (i, t_k), (i, t_{k+1}), \dots, (i, t_{k+l}) \rangle \in A$ , где  $l \leq T$  – количество интервалов времени, необходимых нарушителю для пересечения зоны,  $A$  – множество чистых стратегий нарушителя.

Если нарушитель в некоторый момент времени окажется в той же зоне, что и БПЛА, то он может быть обнаружен (совпадающие вершины графа). Множество совпадающих вершин:  $V_{(w,a)} = \{(j, t_k) \mid (j, t_k) \in d_w, \exists (i, t_k) \in a, i \in j\}$ .

Обозначим  $\delta(v)$  – вероятность обнаружения нарушителя в вершине  $v \in V_{(w,a)}$ . Тогда вероятность  $p(w, a)$  обнаружения нарушителя  $w$ -м БПЛА равна:

$$1 - p(w, a) = \prod_{v \in V_{(w,a)}} (1 - \delta(v)). \quad (8.3.6)$$

Полагая, что БПЛА обнаруживают нарушителей независимо друг от друга, вероятность обнаружения нарушителя защитником равна:

$$1 - p(d, a) = \prod_{w=1}^m (1 - p(w, a)). \quad (8.3.7)$$

Цель нарушителя – максимизация функции:

$$U_a(d, a) = \prod_{w=1}^m \prod_{v \in V_{(w,a)}} (1 - \delta(v)). \quad (8.3.8)$$

Поскольку защитник применяет смешанные стратегии, целевая функция нарушителя равна:

$$U_a(x, a) = \sum_d x_d U_a(d, a), \quad (8.3.9)$$

а целевая функция защитника равна:  $U_d(x, a) = -U_a(x, a)$ .

Для нахождения оптимальных стратегий сторон необходимо решить следующую задачу:

$$\max_{x,y} U_d(x, y), \quad \sum_{d=1}^{|D|} x_d = 1, \quad x \in [0, 1]^{|D|}, \quad (8.3.10)$$

$$\max_y U_a(x, y), \quad \sum_{a=1}^{|A|} y_a = 1, \quad y \in [0, 1]^{|A|}, \quad (8.3.11)$$

где  $x_d$  и  $y_a$  – вероятности выбора чистых стратегий защитником и нарушителем,  $y = (y_a)_{a \in A}$ .

Метод и результаты решения задачи (8.3.10–8.3.11) рассмотрены в статье [510].

Актуальными задачами моделирования применения БПЛА в охране границы являются следующие:

- анализ эффективности и управление БПЛА для обнаружения нарушителей (признаков нарушения границы), наведения на них групп задержания;
- поиск оптимальных маршрутов патрулирования границы с учетом времени суток, состояния погоды, характеристик местности, инфраструктуры, упреждаемых зон и др.
- определение потребного количества БПЛА и мест дислокации базовых станций для решения задач охраны границы.

### 8.3.2. Модели применения прожекторных станций в охране границы

Воинские команды, оснащенные прожекторами, в русской армии и на флоте впервые появились во время русско-японской войны 1904–1905 годов при обороне Порт-Артура. Для воздействия на наземного противника прожекторы впервые массово применены в Берлинской операции ночью 16 апреля 1945 года. С послевоенных лет прожекторы стали применяться в охране границы для решения следующих задач: обнаружение и распознавание нарушителей границы, постановка световых завес, психологическое воздействие на нарушителей с целью отказа от попытки нарушения границы на уязвимых направлениях и др.

Воздействие светотехнических средств на нарушителей основано на том факте, что прожектор излучает мощный поток световой энергии, создавая на сетчатке глаза человека определенный уровень светового ощущения. Плотность светового потока по освещаемой поверхности характеризуется освещенностью  $E$ . Известно, что если нарушитель находится внутри прожекторного пучка, то общая освещенность его поверхности является суммой трех слагаемых [184]:

- освещенности  $E_1$ , создаваемой непосредственным световым потоком от прожектора;

- освещенности  $E_2$ , создаваемой атмосферным фоном, расположенным перед объектом (нарушителем) и получившим яркость за счет первичного рассеяния;

- освещенности  $E_3$ , создаваемой атмосферным фоном, расположенным перед объектом (нарушителем) и получившим яркость за счет вторичного рассеяния.

Первая составляющая освещенности рассчитывается по формуле:

$$E_1 = \frac{I_\alpha}{L^2} e^{-KL}, \quad (8.3.12)$$

где:  $I_\alpha$  – сила света прожектора в направлении, характеризуемым углом  $\alpha$  (угол между оптической осью прожектора и направлением на нарушителя), Кд;  $L$  – расстояние между прожектором и нарушителем, км;  $K$  – коэффициент, выражающий ослабление светового потока атмосферой, 1/км.

В охране границы многих стран применяются прожекторные станции типа АПМ-90 (осевая сила света 130 МКд) и Б-200 (осевая сила света 1900 МКд). В таблице 8.3.1 показаны значения первой составляющей освещенности, создаваемой прожектором типа АПМ-90 при нормальной погоде

( $K = 0,05 \text{ км}^{-1}$ ) на объекте, расположенном перпендикулярно к источнику света.

Таблица 8.3.1. Значения первой составляющей освещенности, создаваемой прожектором

| Расстояние между прожектором и объектом, м | Освещенность, лк | Примечание                                     |
|--|------------------|--|
| 35   | 105 937          | Освещенность солнечными лучами в полдень       |
| 100  | 12 935           | Освещенность при киносъемке в студии           |
| 350  | 1 043            | Освещенность в пасмурный день                  |
| 500  | 507              | Освещенность на рабочем столе для тонких работ |
| 1900                                       | 33               | Освещенность, необходимая для чтения           |
| 17500                                      | 0,18             | Освещенность от полной луны                    |

Вторая составляющая обратно пропорциональна расстоянию между нарушителем и прожектором. При расположении нарушителя на оптической оси прожектора она вычисляется по формуле:

$$E_2' = \frac{2,36KF}{\pi L \alpha_m} e^{-KL}, \quad (8.3.13)$$

где:  $F$  – световой поток прожектора;  $\alpha_m$  – угловой размер пучка, в пределах которого сила света прожектора постоянна.

Если нарушитель расположен за пределами светового пучка, то вторая составляющая рассчитывается как:

$$E_2'' = \frac{0,36KF}{l} e^{-KL}, \quad (8.3.14)$$

где  $l$  – расстояние между нарушителем и оптической осью прожектора.

Третья составляющая освещенности нарушителя возникает за счет того, что некоторый объем пространства освещается всеми элементами светового пучка, рассеивающими часть светового потока в его направлении. В свою очередь, этот объем сам рассеивает световой поток в направлении к нарушителю, создавая на нем некоторую освещенность.

В зависимости от угла  $\alpha$  между оптической осью прожектора и нарушителем, третья составляющая вычисляется по формуле:

$$E_3 = \begin{cases} 0,27 \frac{K^2 FL}{I} e^{-KL}, & \alpha > 2,1\sqrt{\alpha_m}, \\ 0,258 \frac{K^2 F}{\sqrt{\alpha_m}} e^{-KL}, & \alpha \leq 2,1\sqrt{\alpha_m}. \end{cases} \quad (8.3.15)$$

Сформулируем гипотезу – вероятность отказа от попытки нарушения контролируемого рубежа подчиняется показательному закону:

$$P_o = e^{-\lambda L}, \quad (8.3.16)$$

где  $\lambda$  – параметр распределения.

Для проверки данной гипотезы и определения неизвестного параметра были изучены описания действий нарушителей и сил охраны за 1970-1989 гг. Из рассмотрения были исключены случаи нарушений при осадках и малой видимости. Местность по преимуществу малопересеченная и/или полузакрытая. В выборку были включены ситуации только для одного типа прожекторов (с осевой силой света 130 МКд). Режим использования прожекторных станций таков: 10 минут освещение, 20-30 минут прожектор выключен, ведение наблюдения. Влияние сигнализационных комплексов на выбор места пересечения рубежа можно сразу исключить из рассмотрения, поскольку они перекрывают без разрывов десятки и сотни километров. В указанный период все описанные ситуации происходили в условиях, когда рассмотренные участки были оборудованы сигнализационными и контролирующими средствами, способными с высокой надежностью зафиксировать признаки преодоления нарушителями контролируемой полосы.

В результате статистической обработки данных о движении нарушителей границы в условиях воздействия прожекторных станций получено следующее выражение для расчета вероятности отказа от попытки нарушения границы:

$$P_o = \exp\left\{-\left(\frac{\Pi_o}{I_o K_r R_0} + K\right)L\right\}, \quad \Pi_o = 0,17 \cdot 10^8 \text{ Кд/км}, \quad (8.3.17)$$

где:  $I_o$  – осевая сила света, Кд;  $L$  – расстояние между нарушителем и прожектором, км;  $K$  – коэффициент, выражающий ослабление светового потока атмосферой, 1/км;  $K_r$  – коэффициент учета рельефа;  $R_0$  – режим освещения местности (доля времени, в течение которого прожектор освещает местность).

Коэффициент  $K$  ослабления светового потока атмосферой полагается для нормальной погоды равным  $0,05 \text{ км}^{-1}$ , для осадков –  $0,22 \text{ км}^{-1}$ . В первом приближении для ровной открытой местности следует считать  $K_r = 1$ , для слабопересеченной или равнинной, но покрытой кустарником, высокой травой местности целесообразно принять  $K_r = 0,5$ .

Полученное выражение для расчета вероятности отказа нарушителей от движения в выбранном направлении может использоваться в комплексных моделях охраны границы и в задаче выбора оптимальных позиций прожекторных станций.

### 8.3.3. Комплексирование моделей охраны границы

Комплексирование моделей охраны границы обычно выполняется по горизонтали (по видам пограничных мер, функциям пограничных сил и средств) и вертикали (по уровням моделирования) [217; 385]. Уровни моделирования пограничной безопасности показаны в табл. 8.3.2.

Таблица 8.3.2. Уровни моделирования пограничной безопасности

| Моделируемые явления и процессы   | Задачи и методы моделирования   |
|---|---|
| <i>1. Физико-географический уровень</i>   |   |
| Использование геоинформационных, метеорологических, гидрологических и океанологических данных, характеризующих участок границы (район исключительной экономической зоны), промысловую обстановку и определяющих параметры движения и возможности нарушителя и пограничных средств | Построение маршрутов и сетей движения нарушителей и пограничных средств, маршрутов миграции животных, определение непроходимых (неиспользуемых) участков и районов, расчет временных параметров движения для различных условий, выбор мест возможной установки пограничных средств, расчет зон видимости, определение вероятных районов добычи сельскохозяйственных, аква- и других продуктов и др.<br>Методы: аналитическая геометрия, математический анализ, теория графов; методы географии, геодезии, метеорологии, океанологии, промыслового рыболовства и т. д. |
| <i>2. Инженерно-технический уровень</i>   |   |
| Учет степени оборудования местности в инженерном и инженерно-техническом отношении  | Оптимизация маршрутов и сетей движения (затруднение действий нарушителей и повышение оперативности действий пограничных сил и средств), расширение зон видимости, построение сети (графа) позиций пограничных средств и др.<br>Методы: аналитическая геометрия, математический анализ, теория графов; методы географии, военной и пограничной маскировки, исследования операций и т. д.   |
| <i>3. Физико-технический уровень</i>  |   |
| Учет используемых физических полей для обнаружения, технических характеристик пограничных средств и средств нарушителей   | Построение частных зон обнаружения и распознавания по конкретным целям с учетом внешних условий и для различных возможных средств и позиций (мест установки).<br>Методы физики и ее разделов, радиолокации, гидролокации, технических дисциплин и др.   |
| <i>4. Информационно-технический уровень</i>   |   |
| Возможности по обмену информацией как между нарушителями, так и между элементами пограничной системы, возможности по наведению  | Построение и оптимизация сетей информационного обмена, разведка и защита сетей. Построение сети информирующих средств.  |

| Моделируемые явления и процессы  | Задачи и методы моделирования  |
|--|--|
| средств на нарушителя. Учет используемых информирующих средств   | Математические дисциплины, информатика и связь, методы защиты информации   |
| <i>5. Системно-технический уровень</i>   |  |
| Объединение разнородных технических средств в единую пограничную техническую систему   | Расчет надежности системы, построение и оптимизация единой системы контроля обстановки (поля обнаружения, распознавания, наведения и воздействия штатных и приданных средств).<br>Системотехника, теория надежности, технические дисциплины  |
| <i>6. Социотехнический уровень</i>   |  |
| Анализ системы «человек-машина» с точки зрения выполнения ею тактических задач, создание системы улучшений существующих средств и системы эксплуатации   | Расчет готовности системы, обоснование системы эксплуатации и сопровождения; обоснование требований к рабочим местам (местам несения службы); оптимизация системы контроля несения службы и др.<br>Методы и модели физиологии и психологии; теория игр, теория массового обслуживания, теория эксплуатации и ремонта, теория надежности, управление запасами, теория организационных систем и др.  |
| <i>7. Операционный уровень</i>   |  |
| Реализация действий: порядок и правила несения службы, маскировки, преследования, уклонения и т. д.  | Оптимизация действий одиночных и групповых пограничных средств (поиск, обнаружение, преследование, задержание), обеспечение собственной безопасности и др.<br>Теория поиска, теория вероятностей и статистическая теория решений, оптимальное управление и т. д.; модели несения службы пограничными нарядами, самолетами (вертолетами, БПЛА), кораблями и катерами, модели применения в охране границы технических и других средств   |
| <i>8. Tактический уровень</i>  |  |
| Пограничный менеджмент и режимные мероприятия – борьба с угрозами низшего уровня. Выбор оптимальных действий нарушителями и пограничной системой, мест и времени несения службы и т. д. Планирование охраны границы на участке подразделения. Обоснование элементов замысла на охрану границы (прогнозирование НВДНГ, обоснование НСОУ, построение охраны границы, порядок действий по задержанию нарушителей) | Моделирование охраны границы (района ИЭЗ) подразделениями на период. Построение и оптимизация зон своевременного обнаружения и сопровождения нарушителей. Моделирование и оптимизация действий подразделения по обстановке, моделирование взаимодействия с другими силами и средствами.<br>Теория игр, многокритериальное принятие решений, оптимизационные модели, теория пограничной службы, пограничного поиска и пограничного сдерживания, теория оперативно-розыскной деятельности (ОРД), теория полезности, теория дискретного выбора, имитационные модели и др. |

| Моделируемые явления и процессы  | Задачи и методы моделирования  |
|--|--|
| <i>9. Оперативно-тактический уровень</i>   |  |
| <p>Борьба с угрозами среднего уровня.<br/>Организация охраны границы.<br/>Участие в защите границы</p> | <p>Оценка угроз, связанных с трансграничной преступностью (нелегальная миграция, контрабанда, терроризм и др.). Моделирование и оптимизация действий в пограничных конфликтах, пограничных и специальных операциях. Моделирование барьерной и контактной функции границ. Моделирование функций пограничной политики: сдерживания, интегрирования информации и информационного управления.<br/>Методы: комплексирование моделей, теория игр, многокритериальное принятие решений, системный анализ, криминология, теория ОРД, погранология, имитационное моделирование и др.</p>  |
| <i>10. Оперативный уровень</i>   |  |
| <p>Борьба с угрозами высокого уровня.<br/>Защита и охрана границы</p>                                  | <p>Оценка угроз, связанных с проявлениями национального и религиозного экстремизма, этнического и регионального сепаратизма, действиями специальных и иных групп других государств.<br/>Моделирование действий разнородных и разноведомственных сил и средств по защите и охране границы. Моделирование построения системы защиты и охраны границы и морских пространств. Моделирование профилактической (предупредительной) функции пограничной политики.<br/>Методы: криминология, погранология, теория ОРД, комплексирование моделей, календарно-сетевое планирование и управление, теория игр, многокритериальное принятие решений, системный анализ, имитационное моделирование и др.</p> |
| <i>11. Оперативно-стратегический уровень</i>   |  |
| <p>Борьба с угрозами высшего уровня.<br/>Организация защиты и охраны границы</p>                       | <p>Оценка угроз, связанных с вооруженными конфликтами и территориальными притязаниями. Оптимизация построения системы защиты и охраны границы; функций границ и пограничной политики; тактических комплектов пограничных сил и средств.<br/>Моделирование обеспечения пограничной политики.<br/>Моделирование пограничного проектного цикла (делимитация и демаркация границы, установление режима, охрана пограничных пространств).<br/>Методы: комплексирование моделей, экспертные оценки, многокритериальное принятие</p>  |

| Моделируемые явления и процессы  | Задачи и методы моделирования   |
|--|---|
|  | решений, системный анализ, методы погранологии и социально-экономических наук   |
| <i>12. Стратегический уровень</i>  |   |
| Проектирование пограничной безопасности.<br>Обоснование мер, направленных на предотвращение кризисов и конфликтов в пограничном пространстве.<br>Развитие когнитивных возможностей руководителей по принятию решений и реализации функций пограничной политики | Оценка систем, факторов и процессов, способных породить угрозы пограничной безопасности.<br>Моделирование и оптимизация функций пограничной политики применительно к прогнозируемым угрозам, политическому и социально-экономическому состоянию государства. Моделирование адаптации пограничных систем.<br>Оптимизация системы обеспечения пограничной политики.<br>Методы геополитики, политологии, погранологии, теории безопасности, теории права, психологии, экономики и эконометрики, теории управления, системного анализа, теории принятия решений и др. |
| <i>13. Уровень целеполагания</i>   |   |
| Проектирование пограничной политики.<br>Выбор целей, проектирование механизмов пограничных воздействий и механизмов функционирования, формулирование пограничной политики и принципов пограничной безопасности   | Моделирование развития пограничных систем.<br>Методы геополитики, политологии, погранологии, теории безопасности, теории права, психологии и социологии, экономики, теории управления, теории управления организационными системами, системного анализа, теории принятия решений и др.  |

В мирное время основные усилия пограничных ведомств направлены на обеспечение деятельности пограничных подразделений (застав, постов, отделений), поскольку ими задерживается большинство нарушителей границы и поддерживаются правовые режимы.

Участок пограничной заставы разделим на полосы, идущие от границы в тыл (рис. 8.3.4).

Для каждой  $k$ -й полосы ( $k = 1, \dots, K$ ) и  $t$ -го интервала времени суток ( $t = 1, \dots, T$ ) рассчитаем вероятность  $p_{kt}$  недопущения нарушения границы [200]:

$$p_{kt} = p_{0kt} + (1 - p_{0kt})p_{zkt}, \quad (8.3.18)$$

где  $p_{0kt}$  – вероятность отказа от нарушения границы за счет воздействия прожекторных станций,  $p_{zkt}$  – вероятность обнаружения и задержания нарушителей в  $k$ -й полосе и в  $t$ -м интервале времени. Порядок расчета названных вероятностей описан в литературе, поэтому не будем на нем останавливаться. Отметим только, что вероятность  $p_{kt}$  является функцией вектора  $x$  решения

(распределения пограничных сил и средств по задачам, полосам, позициям, направлениям и времени)  $p_{kt} = p_{kt}(x)$ .

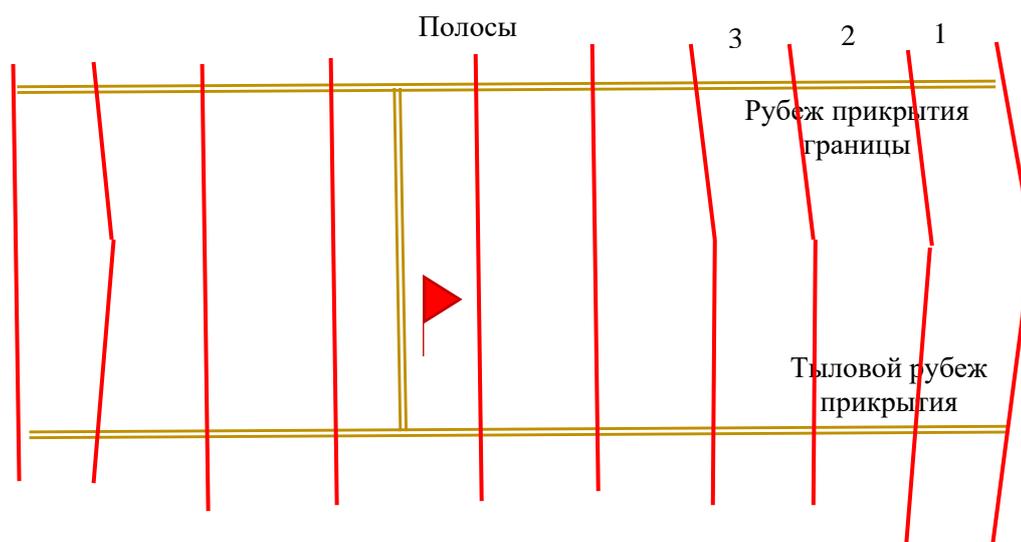


Рис. 8.3.4. Участок пограничной заставы и полосы

Рациональным будет решение, при котором обеспечивается примерно одинаковая вероятность недопущения нарушений границы:

$$p^* \approx p_{kt}(x^*), k = 1, \dots, K, t = 1, \dots, T. \quad (8.3.19)$$

Рациональное решение соответствует принципу непрерывности охраны границы. Результат решения – квазиоптимальное распределение  $x^*$  сил и средств по задачам, рубежам (позициям), полосам и времени. Это распределение соответствует принципу сосредоточения сил и средств на важнейших задачах, полосах и направлениях (на неупреждаемые участки будет выделено больше средств, чем на упреждаемые, ночью больше, чем днем и т. д.).

Более точные решения могут быть получены по результатам имитационного моделирования, тренировок, пусков учебных нарушителей и т. д.

Таким образом, рассмотренная концепция системы пограничных мер позволяет объединить в единую систему разнородные и разномасштабные модели обеспечения безопасности в пограничном пространстве, охраны государственной границы, формирования облика пограничных сил. Выполненные в России и за рубежом исследования создают предпосылки для разработки автоматизированных систем управления пограничными силами и платформы моделирования пограничной безопасности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ГЕТЕРОГЕННЫЕ МОДЕЛИ И ИХ КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ

С точки зрения используемых методов моделирования итог настоящей работы представлен в таблице 3.1. Разделы монографии (столбцы таблицы), логически и содержательно объединенные в главы, посвящены исследованию конкретных прикладных проблем и используют один или несколько методов («инструментов», строки таблицы). И наоборот, каждый метод (раздел прикладной математики и исследования операций) используется во многих классах моделей военных, боевых и специальных действий, охраны границы.

Таблица 3.1. Методы моделирования военных, боевых и специальных действий, охраны границы

| Методы («инструменты») моделирования |                                    | Глава 2 |     |     |     | Глава 3 |     |     |     | Глава 4 |     |     |     | Глава 5 |     |     |     | Глава 6 |     |     |     | Глава 7 |     |     |     | Глава 8 |     |     |     |     |     |     |     |  |
|--------------------------------------|------------------------------------|---------|-----|-----|-----|---------|-----|-----|-----|---------|-----|-----|-----|---------|-----|-----|-----|---------|-----|-----|-----|---------|-----|-----|-----|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
|                                      |                                    | 2.1     | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 3.1     | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 4.1     | 4.2 | 4.3 | 4.4 | 5.1     | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.5     | 5.6 | 5.7 | 5.8 | 6.1     | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 7.1     | 7.2 | 7.3 | 7.4 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.4 |  |
| Теория вероятностей                  | Вероятности сложных событий        |         |     |     |     | +       | +   | +   | +   | +       |     |     |     |         | +   | +   |     |         |     |     | +   | +       | +   | +   |     |         |     |     | +   | +   | +   | +   |     |  |
|                                      | Цепи Маркова                       |         |     |     |     |         |     |     |     |         | +   |     |     |         |     | +   |     |         |     |     |     |         |     |     | +   |         |     |     |     |     |     |     |     |  |
|                                      | Модели поиска                      |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         | +   | +   | +   | +       |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |  |
|                                      | Системы массового обслуживания     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         | +   | +   |     |         |     |     |     |     | +   |     |     |  |
|                                      | Надежность                         |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         | +   | +   |     |         |     |     |     |     |     |     |     |  |
|                                      | Математическая статистика          | +       | +   | +   |     |         |     |     |     | +       |     |     |     |         | +   |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     | +   | +   |     | +   |  |
| Имитационные модели и военные игры   |                                    |         |     |     | +   |         |     |     |     |         |     |     | +   | +       |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     | +       |     |     |     | +   |     |     |     |  |
| Дифференциальные уравнения           |                                    |         |     | +   | +   |         |     |     |     | +       | +   | +   |     |         | +   |     |     |         |     |     |     |         |     |     | +   |         |     |     | +   |     |     |     | +   |  |
| Теория графов                        |                                    |         |     |     | +   |         |     |     |     |         |     | +   |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     | +   | +   |     |     |     |  |
| Оптимизация                          | Линейное программирование          |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     | +   |         |     |     |     |     |     |     |     |  |
|                                      | Безусловная и условная оптимизация | +       |     |     |     |         | +   | +   |     |         | +   | +   |     |         | +   | +   |     |         |     |     |     |         |     |     | +   |         | +   | +   | +   | +   | +   | +   | +   |  |
|                                      | Динамическое программирование      |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     | +   |         |     |     |     |     |     |     |     |  |
|                                      | Оптимальное управление             |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     | +   |         |     |     |     |     |     |     |     |  |
| Теория игр                           | Матричные игры                     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         | +   |     |     |         |     |     |     |         |     |     | +   |         |     |     |     |     |     |     |     |  |
|                                      | Игры в нормальной форме            | +       |     |     |     |         |     |     |     |         |     | +   |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     | +   |         |     |     | +   |     |     |     |     |  |
|                                      | Иерархические игры                 |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     | +   |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     | +   | +   |     | +   |     |  |
|                                      | Дифференциальные игры              |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     | +   |     |         |     | +   |     |         |     |     | +   |         |     |     |     |     |     |     |     |  |
|                                      | Рефлексивные игры                  |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     | +   |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |     |     |     |     |  |
|                                      | Сетевые игры, игры на графах       |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     |     |         |     |     | +   | +   |     | +   |     |  |

В последние годы в математическом моделировании все более распространенным становится термин «гетерогенность» системы, понимаемая, прежде всего, как разнородность её математического описания, например, разнородности описания отдельных подсистем, в частности, типа и масштаба шкалы времени, в которой функционирует подсистема, разнотипности языка описания отдельных закономерностей, присущих объекту изучения и т. д. Термин «гетерогенность» также часто используется для обозначения сложности, проявляющейся в *разнородности* (как качественной, так и временной и функциональной), *распределенности* (в пространстве и времени), *иерархичности/сетевой структуры* моделируемого объекта или процесса [255].

Адекватной технологией построения и совместного исследования комплекса моделей гетерогенных систем является т. н. *иерархическое моделирование*, когда модели, описывающие различные части исследуемой системы или различные ее свойства (быть может, с различным уровнем детализации) упорядочиваются в определенной логике – выстраиваются в иерархию (обычно более низким уровням иерархии соответствует более высокая степень детализации описания моделируемых систем) или в последовательность – горизонтальную «цепочку», в каждом элементе которой степень детализации примерно одинакова, причем результаты одной модели, являются исходными данными для следующей. Подобный подход к моделированию зародился и активно развивался в 60–70-х годах XX века [66; 228].

Иерархические модели являются, в некотором смысле, более широкой категорией, чем гибридные модели и многомодельный подход.

*Гибридная модель* – модель, согласованно сочетающая в себе элементы двух или более моделей, отражающих различные аспекты исследуемого явления или процесса и/или использующих различный аппарат (язык) моделирования – см. рис. 3.1. Например, гибридная модель может включать в себя дискретную и непрерывную подмодели, или цифровую и аналоговую и т. д.

В более широком понимании гибридная модель, представляет собой комплекс моделей, выбор каждой конкретной из которых происходит в зависимости от текущего состояния системы и/или времени и/или выполнения каких-либо других условий – см. рис. 3.2.



Рис. 3.1. Гибридная модель: узкое понимание

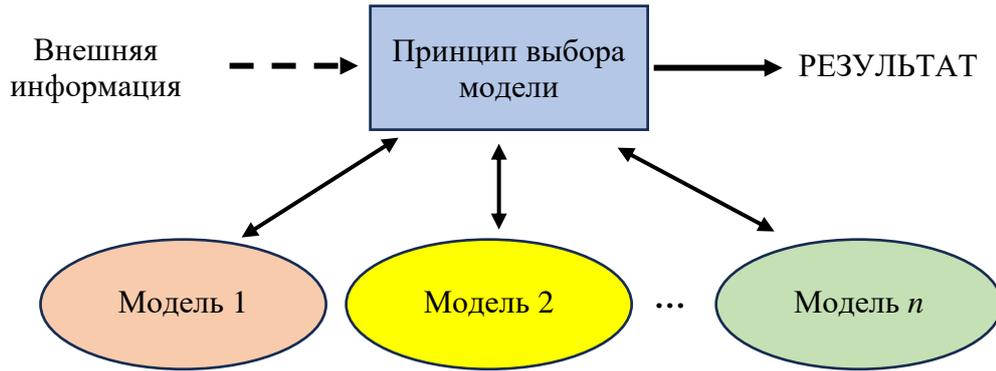


Рис. 3.2. Гибридная модель: современное понимание. Многомодельность

В рамках *многомодельного подхода* несколько моделей используются последовательно или параллельно с последующим или текущим анализом и выбором «лучших» результатов.

Иерархические (последовательные) модели могут иметь еще более сложную структуру (см. рис. 3.3), причем модель каждого уровня может быть гибридной или использовать многомодельный подход. При их использовании возникают, в том числе, хорошо известные в математическом моделировании проблемы *агрегирования* и *декомпозиции*.

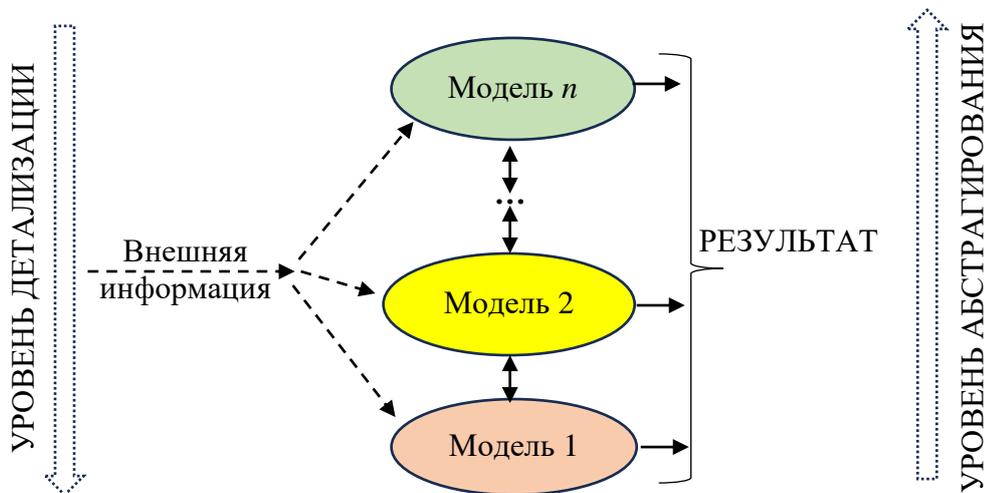


Рис. 3.3. Иерархическая (последовательная) модель

Приведем два примера структуры иерархических моделей.

**Модель боевых действий** [253]. Если противники однократно и одновременно принимают решения о распределении своих ресурсов (сил и средств) «в пространстве» (между плацдармами), то получаем *игру полковника Блотто* (см. раздел 4.3.1), в которой победитель на каждом из плацдармов определяется в результате решения соответствующих *уравнений Осипова-Ланчестера* (см. раздел 4.2.1). Другими словами, можно рассматривать «иерархическую» модель, в которой на верхнем уровне иерархии игроки

распределяют свои ресурсы между плацдармами в рамках той или иной вариации теоретико-игровой модели, а на нижнем уровне исход сражения на каждом из плацдармов описывается той или иной вариацией модели Осипова-Ланчестера.

Для моделей Осипова-Ланчестера также можно использовать иерархический подход – на нижнем уровне *методом Монте-Карло* имитируется взаимодействие отдельных боевых единиц, на среднем уровне взаимодействие описывается марковскими моделями (см. раздел 4.1.2), а на верхнем (агрегированном, детерминированном) уровне используются собственно дифференциальные уравнения. «Над» этими моделями, вводя в них управляемые параметры (распределение сил и средств во времени – ввод резервов и т. д.), можно надстраивать задачи управления в терминах управляемых динамических систем, *дифференциальных и/или повторяющихся* игр и др. В результате получим иерархическую модель, приведенную в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Иерархическая модель боевых действий

| Уровень иерархии | Моделируемые явления/процессы              | Аппарат моделирования                            |
|------------------|--|--|
| 5                | Распределение сил и средств в пространстве | Игра полковника Блотто и ее модификации          |
| 4                | Распределение сил и средств во времени     | Оптимальное управление, повторяющиеся игры и др. |
| 3                | Динамика численности                       | Уравнения Осипова-Ланчестера и их модификации    |
| 2                | «Локальное» взаимодействие подразделений   | Марковские модели                                |
| 1                | Взаимодействие отдельных боевых единиц     | Имитационное моделирование, метод Монте-Карло    |

**Модель диффузной бомбы** (см. раздел 4.4.2 и [255]). Примером иерархической модели мультиагентной системы является задача о диффузной бомбе, которая заключается в следующем: группа автономных подвижных агентов должна поразить цель с заданными координатами. В каждый такт времени каждый агент может быть с определенной вероятностью обнаружен и уничтожен системой обороны. Вероятность обнаружения/уничтожения зависит от координат агента, его скорости и расположения относительно других агентов. Задача заключается в синтезе таких алгоритмов децентрализованного взаимодействия агентов и принятия ими решений о направлении и скорости движения, чтобы максимизировать число агентов, достигших цели. «Интеллектуальность» агентов заключается, в том числе, в том, что часть агентов-разведчиков, может оперативно получать информацию о параметрах системы обороны. Остальные агенты, наблюдая за поведением разведчиков

(в условиях ограничений на коммуникации между агентами), «рефлексируя» получают оценку опасной области и решают поставленную задачу. Стратегическое взаимодействие противоборствующих сторон может описываться в терминах теории игр.

В целях оценки и выбора наиболее эффективных алгоритмов поведения в [176; 178] используется иерархическая модель, приведенная в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Модель диффузной бомбы

| Уровень иерархии | Моделируемые явления/ процессы                                      | Аппарат моделирования                           |
|------------------|---|---|
| 6                | Выбор состава группы агентов и их свойств                           | Методы дискретной оптимизации                   |
| 5                | Выбор агентами траекторий и скоростей движения                      | Оптимальное управление                          |
| 4                | Прогноз агентом поведения других агентов                            | Рефлексивные игры. Метод рефлексивных разбиений |
| 3                | Минимизация вероятности обнаружения на основании текущей информации | Алгоритмы выбора направления движения           |
| 2                | Избежание столкновений, обход препятствий                           | Алгоритмы выбора локальных траекторий           |
| 1                | Движение агента к цели  | Уравнения динамики движения                     |

Таким образом, в общем случае комплексирование моделей выполняется двумя способами: а) вертикальное комплексирование (результаты расчетов на нижнем уровне моделирования являются входными данными для расчетов на верхнем – моделирование снизу вверх; модели верхнего уровня задают исходные данные для расчетов, целевые функции и ограничения – моделирование сверху вниз); б) горизонтальное комплексирование (по циклам и фазам деятельности и мер – результаты моделирования на одном этапе являются исходными данными для моделирования на другом этапе).

При вертикальном комплексировании могут использоваться следующие показатели:

- потенциал безопасности государства, союза (содружества) и коалиции государств; количественно оценивается сравнением значений функции безопасности и функции сохранения (устойчивости);

- военные потенциалы сторон (военно-экономические, военно-научные, военно-демографические, а также социальные, политические, духовные и др. возможности государства, используемые в военных целях);

- возможности государства по выделению ресурсов для нейтрализации угроз военного и невоенного характера на государственной границе;

– боевые потенциалы сторон (совокупность материальных и духовных возможностей вооруженных сил, определяющих их способность эффективно выполнять стоящие перед ними задачи, вести боевые действия);

– возможности военных и пограничных сил по надежной охране государственной границы.

Горизонтальное комплексирование может быть основано на построении и последующей интеграции моделей по следующим основаниям:

– фазы управления (модели подготовки и ведения военных, боевых и специальных действий, охраны границы);

– сферы войны (моральная, ментальная и физическая война);

– элементы системы пограничных мер (предупредительные, охранно-контрольные, защитно-боевые меры) и др.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

## ПРИМЕРНАЯ ПРОГРАММА И ЛИТЕРАТУРА ПО СИСТЕМНЫМ И МАТЕМАТИЧЕСКИМ ОСНОВАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЕННЫХ, БОЕВЫХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ДЕЙСТВИЙ<sup>1</sup>

### 1. Кибернетика и системный анализ

**1.1. Классификация систем управления. Кибернетика. Военная кибернетика.** Классификация систем управления. [20, с. 11–31]. Кибернетика в XX веке [20, с. 46–56; 12, с. 7–31]. Философия и методология управления [12, с. 32–40]. Законы, закономерности и принципы управления [20, с. 57–65]. Военная кибернетика (раздел 1.3).

**1.2. Теория систем. Системный анализ.** История системных исследований [5, с. 12–46]. Системный подход и системный анализ в трудах В.К. Триандафиллова [21]. Модели и моделирование [14, с. 35–61]. Системы, модели систем [14, с. 69–93]. Подходы и методы системного анализа [5, с. 211–266]. Предмет и задачи исследования операций [4, с. 9–51].

**1.3. Моделирование.** Классификация математических моделей. Требования, предъявляемые к математическим моделям. Этапы моделирования. Проверка адекватности модели [1, с. 11–32; 3, с. 11–90; 19, с. 20–44, 84–94].

### 2. Основания математического моделирования

**2.1. Аналитическая геометрия, линейная алгебра и математический анализ.** Векторы [11, с. 402–430]. Аналитическая геометрия на плоскости [11, с. 17–100]. Аналитическая геометрия в пространстве [11, с. 441–470]. Определители и решение систем линейных уравнений [11, с. 383–401]. Переменная, предел, функция [11, с. 101–148]. Производная и дифференциал [11, с. 149–230]. Неопределенный интеграл [11, с. 261–307]. Определенный интеграл [11, с. 308–327, 375–382]. Функции нескольких переменных [11, с. 472–500].

---

<sup>1</sup> Настоящее Приложение носит методический характер и отражает минимальные знания в области прикладной математики, необходимые читателю для осознанного прочтения материала настоящей книги и применения соответствующих результатов в своей практической деятельности.

**2.2. Обыкновенные дифференциальные уравнения.** Уравнения первого порядка [11, с. 501-524]. Простейшие дифференциальные уравнения высшего порядка [11, с. 530-536]. Системы дифференциальных уравнений [11, с. 574-579].

**2.3. Оптимизация.** Задачи безусловной оптимизации, классический метод [10, с. 32-39]. Задачи на условный экстремум. Правило множителей Лагранжа [10, с. 40-50]. Выпуклые и сильно выпуклые функции [10, с. 140-156]. Линейное программирование, симплекс-метод, транспортная задача, целочисленное программирование [10, с. 81-91; 24, с. 74-125]. Методы минимизации функций одной переменной [10, с. 186-198]. Общая постановка задачи оптимального управления. Классификация задач оптимального управления [10, с. 266–276]. Динамическое программирование: принцип оптимальности, функции и уравнения Беллмана [10, с. 327–334].

**2.4. Теория вероятностей.** Схема Бернулли. Теорема Пуассона для схемы Бернулли [22, с. 43-48; 9, с. 37-40]. Случайные величины и их распределения [22, с. 49-70; 9, с. 49-72]. Числовые характеристики распределений [22, с. 89-100]. Предельные теоремы теории вероятностей [22, с. 121-128; 9, с. 99-108]. Последовательность зависимых испытаний. Цепи Маркова [9, с. 44-47]. Случайные процессы [9, с. 110-115]. Марковские процессы. Процесс размножения и гибели [9, с. 115-119].

**2.5. Математическая статистика.** Выборочные характеристики и их свойства [23, с. 7-19]. Метод максимального правдоподобия [23, с. 23-34]. Интервальное оценивание [23, с. 59-66]. Распределения, связанные с нормальным. Точные доверительные интервалы для параметров нормального распределения [23, с. 67-80]. Проверка гипотез и критерии согласия [23, с. 81-112]. Проверка непараметрических гипотез [6, с. 207–236]. Общая модель линейной регрессии [23, с. 113-122]. Байесовский подход к оцениванию параметров [23, с. 131-140].

### Раздел 3. Модели и методы принятия решений

**3.1. Индивидуальное принятие решений.** Математическая модель ситуации принятия решения. Виды оценок и шкал [17, с. 17–36; 18, с. 31–56]. Отношения предпочтения. Функции полезности [13, с. 558-566].

**3.2. Коллективное принятие решений. Теория выбора.** Принятие коллективных решений [15, с. 287–292]. Основные правила определения победителя при голосовании, процедуры Борда и Кондорсе [15, с. 294–305].

Модели агрегирования индивидуальных предпочтений и теорема Эрроу [15, с. 313–333].

**3.3. Многокритериальное принятие решений.** Множество Парето. Метод уступок. Метод идеальной точки. Метод ограничений [24, с. 219-246]. Взвешенная сумма критериев [17, с. 15-20]. Качественная важность критериев [17, с. 22-41]. Количественная важность критериев [17, с. 42-62]. Метод анализа иерархий [15, с. 203-212].

**3.4. Принятие решений в условиях вероятностной неопределенности.** Выбор в условиях неопределенности. Критерии принятия решений для выбора оптимальной стратегии в условиях риска и неопределенности: Байеса-Лапласа, Гермейера, Бернулли-Лапласа, максиминный (Вальда), минимаксного риска Сэвиджа, Гурвица. Теория статистических решений [15, с. 135–146]. Дерево решений. Марковские задачи принятия решений [15, с. 135-151].

**3.5. Принятие решений в условиях нечеткой неопределенности.** Определение нечеткого множества. Свойства нечетких множеств. Нечеткие отношения и их свойства. Модели принятия решений при нечеткой исходной информации [13, с. 567-577].

## 4. Исследование операций

**4.1. Теория графов.** Основные понятия теории графов. Экстремальные пути и контуры на графах. Псевдопотенциальные графы. Задачи о максимальном потоке. Задачи календарно-сетевого планирования и управления [13, с. 525-557].

**4.2. Теория игр.** Классификация и примеры игр [7, с. 45-50]. Игры в нормальной форме [1, с. 8-51; 7, с. 61-67; 16, с. 9-46]. Дифференциальные игры и игры преследования [20, с. 463-481; 16, с. 230-289]. Иерархические игры [1, с. 113-123; 7, с. 117-132; 16, с. 194-204]. Рефлексивные игры [13, с. 411-418].

**4.3. Системы массового обслуживания.** Уравнения Колмогорова. Предельные вероятностные состояния. Базовые понятия и классификация систем массового обслуживания. Стационарный режим функционирования [8, с. 328–359].

**4.4. Надежность.** Определение, виды, критерии и количественные характеристики надежности. Показатели безотказности, ремонтпригодности, долговечности и сохраняемости. Виды и характеристики отказов. Законы распределения отказов. Виды резервирования: структурное, функциональное, временное, информационное, нагрузочное [12, с. 11–111].

### Литература к Приложению 1

1. *Боев В. Д.* Имитационное моделирование систем: учебное пособие для вузов. – М.: Издательство Юрайт, 2023. – 253 с.
2. *Васин А. А., Морозов В. В.* Теория игр и модели математической экономики: учебное пособие. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 272 с.
3. Введение в математическое моделирование: Учеб. Пособие / Под ред. Трусова П.В. – М.: Логос. 2005. – 440 с.
4. *Вентцель Е. С.* Исследование операций: задачи, принципы, методология. – 6-е изд., стер. – М.: Издательство «Кронус», 2018. – 208 с.
5. *Волкова В. Н.* Истоки и перспективы развития наук о системах. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политех-Пресс, 2022. – 412 с.
6. *Горяинов В. Б., Павлов И. В., Цветкова Г. М., Тескин О. И.* Математическая статистика. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 424 с.
7. *Губко М. В., Новиков Д. А.* Теория игр в управлении организационными системами. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИПУ РАН, 2005. – 138 с.
8. Исследование операций в экономике: учебник для вузов / под ред. Н. Ш. Кремера. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2023. – 414 с.
9. *Ковалев Е. А., Медведев Г. А.* Теория вероятностей и математическая статистика. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 284 с.
10. Методы оптимизации: учебник и практикум для вузов / Под редакцией Ф. П. Васильева. – М.: Издательство Юрайт, 2023. – 375 с.
11. *Натансон И. П.* Краткий курс высшей математики: учебное пособие. 10-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 736 с.
12. *Новиков Д. А.* Кибернетика: Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития. – М.: ЛЕНАНД, 2016 – 160 с.
13. *Новиков Д. А.* Теория управления организационными системами. 4-е изд., испр. и дополн. – М.: ЛЕНАНД, 2022. – 500 с.
14. *Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П.* Основы системного анализа: Учеб. 3-е изд., доп. – Томск: Изд-во НТЛ, 2001. – 396 с.
15. *Петровский А. В.* Теория принятия решений. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 400 с.
16. *Петросян Л. А., Зенкевич Н. А., Семина Е. А.* Теория игр: Учеб. пособие для ун-тов. – М.: Высш. шк., Книжный дом «Университет», 1998. – 304 с.
17. *Подиновский В. В.* Многокритериальные задачи принятия решений: теории и методы анализа. Учебник для вузов. – М.: Издательство Юрайт, 2023. – 486 с.
18. *Рыков А. С.* Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации. – М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. – 608 с.

19. *Советов Б. Я., Яковлев С. А.* Моделирование систем: учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2001. – 343 с.
20. Теория управления (дополнительные главы): Учебное пособие / Под ред. Д. А. Новикова. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 552 с.
21. *Триандафиллов В. К.* Характер операций современных армий. 3-е изд. – М.: Гос. воен. изд-во Наркомата обороны СССР, 1936. – 259 с.
22. *Чернова Н. И.* Теория вероятностей: учебное пособие. – Новосибирск: НГУ, 2007. – 160 с.
23. *Чернова Н. И.* Математическая статистика: учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. – Новосибирск: НГУ, 2014. – 150 с.
24. *Шикин Е. В., Шикина Г. Е.* Исследование операций: учеб. – М.: ТК Велби, Изд-во Проспект, 2006. – 280 с.
25. *Шиммарёв В. Ю.* Надежность технических систем: учебник для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2023. – 289 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2.

### ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ИГР

Настоящее приложение содержит описание основных понятий теории игр, изучающей математические модели принятия решений в *конфликтах* (ситуациях, в которых действуют субъекты, называемые игроками, имеющие несовпадающие интересы). Для более полного ознакомления с проблематикой и результатами использования теоретико-игровых моделей в задачах управления боевыми действиями и организационно-техническими системами можно рекомендовать учебники по классической *теории игр* [2; 6; 10; 14] и *моделям коллективного поведения* [1; 9; 13].

#### Модель конфликта

*Игра*, как формализованная модель конфликта, характеризуется:

- 1) множеством *игроков* (агентов)  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ ;
- 2) семейством множеств *действий* (называемых стратегиями) этих игроков  $x_i \in X_i, i \in N$ , где  $X_i$  – допустимое множество действий  $i$ -го игрока;
- 3) множеством *целевых функций* (функций выигрыша) игроков  $f_i, i \in N$ , отражающих степень достижения ими поставленных целей;
- 4) *последовательностью* (очередностью) действий игроков;
- 5) *информированностью* игроков, наличием или отсутствием обмена информацией и ресурсами между ними и т. д. (см. также раздел 7.2.1).

Разнообразие реальных конфликтов порождает множество формализованных моделей, в основу классификации которых положены перечисленные выше характеристики. Построение модели конфликта является первым и важнейшим этапом решения теоретико-игровых задач.

Построение модели конфликта начинается с определения множества игроков. В бою (сражении) могут участвовать с каждой стороны сотни и тысячи бойцов (субъектов), но не все они являются игроками, т. е. субъектами, самостоятельно выбирающими те или иные действия (и несущие ответственность за этот выбор). При моделировании боя обычно полагается, что в нем участвуют два игрока, преследующие свои цели (причем, как правило, противоположные).

Множества возможных действий игроков и ограничения на эти действия определяются тактико-техническими характеристиками вооружения, используемыми тактическими приемами, параметрами внешней среды и т. д.

Формализованное описание этих множеств может оказаться самостоятельной задачей исследования.

Определение последовательности (очередности) действий игроков является важнейшим этапом формализации игры. Здесь обычно рассматривается два случая (нами рассматриваются только однократные игры, в которых игроки выбирают по одному действию):

1) игроки принимают решения (совершают действия) одновременно и независимо;

2) один из игроков действует первым.

В большинстве теоретико-игровых моделей боевых действий полагается, что игроки принимают решения одновременно. Условия для одновременного принятия решений сторонами – примерно равные: а) продолжительность циклов действий сторон; б) их информированность.

Поясним условие одновременности на примерах. Встречный бой (сражение) – обычно полагается, что стороны (командиры) принимают решения одновременно, оперативно реагируя на изменения обстановки. Мобильная оборона – также полагается одновременное принятие решений сторонами (если обе стороны имеют примерно равные возможности по разведке и маневренности).

Случай позиционной обороны требует дополнительного учета возможностей сторон по маскировке и анализе маневренности. Если возможности сторон по разведке примерно одинаковы, а маневренность (продолжительность цикла действий) разная, то следует считать, что обороняющаяся сторона принимает решение первой, а наступающая сторона принимает решение (действует) второй. Само действие (стратегия) наступающих может включать различные элементы (включая проведение разведки боем, чтобы «нащупать» слабое место в обороне). Если же обороняющаяся сторона превосходит наступающую по разведывательным возможностям, тем самым компенсируя недостаток в маневренности, то можно считать, что стороны принимают решения одновременно.

С точки зрения военной науки одновременное принятие решений означает, что стороны одинаково инициативны и стремятся конвертировать эту инициативу в решительные действия для достижения поставленных задач.

В случае последовательных действий первая сторона (уступающая второй в мобильности и/или разведке) вынуждена принимать решение первой, а вторая сторона (владеющая инициативой) наблюдает действия первой стороны и при необходимости оперативно меняет свои решения, стремясь максимально реализовать свое превосходство в мобильности (разведке).

Иными словами, в терминологии теории игр применительно к анализу боевых и специальных действий, первая сторона (вынужденная принимать решение первой) пассивна, тогда как вторая – активна.

Выигрыш  $i$ -го агента (игрока) зависит от его собственного действия  $x_i \in X_i$ , от *обстановки игры* – вектора действий

$$x_{-i} = (x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \in X_{-i} = \prod_{j \in N \setminus \{i\}} X_j, \quad (\text{П2.1})$$

*оппонентов* (агентов из множества  $N \setminus \{i\}$ ) и от *состояния природы* (внешней среды)  $\theta \in \Omega$  и описывается действительной функцией выигрыша  $f_i = f_i(\theta, x)$ , где  $x = (x_i, x_{-i}) = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X' = \prod_{j \in N} X_j$  – вектор действий всех

агентов, который называется *ситуацией игры*. При фиксированном значении состояния природы совокупность  $\Gamma_0 = (N, \{X_i\}_{i \in N}, \{f_i(\cdot)\}_{i \in N})$  множества агентов, множеств их допустимых действий и целевых функций называется *игрой в нормальной форме*. Решением игры (*равновесием*) называется множество устойчивых в том или ином (и оговариваемом в каждом конкретном случае) смысле векторов действий агентов.

### Некооперативные игры

Рассмотрим теоретико-игровую модель *некооперативного взаимодействия* между  $n$  агентами, предполагая, что они принимают решения одновременно, не имея возможности договариваться о выбираемых действиях, перераспределять получаемую полезность (выигрыш) и т. д.

В силу гипотезы рационального поведения каждый агент будет стремиться выбрать наилучшие для него (с точки зрения значения его целевой функции) действия при заданной обстановке. *Обстановкой* для него будет совокупность состояния природы  $\theta \in \Omega$  и *обстановки игры* (П2.1).

Следовательно, принцип принятия  $i$ -м агентом решения о выбираемом действии (при фиксированных обстановке и состоянии природы) можно записать следующим образом ( $BR$  обозначает *наилучший ответ* – *Best Response*)<sup>1</sup> – рациональным является выбор действий из множества:

$$BR_i(\theta, x_{-i}) = \text{Arg max}_{x_i \in X_i} f_i(\theta, x_i, x_{-i}), \quad i \in N. \quad (\text{П2.2})$$

Рассмотрим возможные принципы принятия решений агентами, каждый из которых порождает соответствующую концепцию равновесия, то есть определяет, в каком смысле устойчивым должен быть прогнозируемый исход игры.

<sup>1</sup> При использовании максимумов и минимумов предполагается, что они достигаются.

**Равновесие в доминантных стратегиях.** Если для некоторого агента множество его наилучших ответов (П2.2) не зависит от обстановки, то оно составляет множество его доминантных стратегий (совокупность доминантных стратегий всех агентов называется *равновесием в доминантных стратегиях* – РДС). Если у каждого из агентов существует доминантная стратегия, то агенты могут принимать решения независимо, то есть выбирать действия, не имея никакой информации и не делая никаких предположений об обстановке. К сожалению, РДС существует далеко не во всех играх.

Для реализации агентами РДС, если последнее существует, достаточно знания каждым из них только своей целевой функции и допустимых множеств  $X'$  и  $\Omega$ .

**Пример 1.** Наступающая сторона (игрок Н) имеет три стратегии распределения своих сил и средств по двум пунктам обороны (игрок О). Выигрыши игрока Н (проигрыш игрока О) таковы:

| Стратегии игрока Н | Стратегии игрока О |                |
|--------------------|--------------------|----------------|
|                    | О <sub>1</sub>     | О <sub>2</sub> |
| Н <sub>1</sub>     | 0,5                | 0,3            |
| Н <sub>2</sub>     | 0,4                | 0,6            |
| Н <sub>3</sub>     | 0,7                | 0,8            |

В данном примере игрок Н имеет доминантную стратегию Н<sub>3</sub> и использует ее, гарантируя выигрыш не менее 0,7. У второго игрока нет своей доминантной стратегии.

**Гарантирующее равновесие.** Той же информированностью должны обладать агенты для реализации *гарантирующего (максиминного) равновесия*, которое существует почти во всех играх и в рамках которого игроки используют *принцип МГР* - максимального (по своим действиям) гарантированного (по обстановке) результата:

$$x_i \in \text{Arg max}_{x_i \in X_i} \min_{x_{-i} \in X_{-i}} \min_{\theta \in \Omega} f_i(\theta, x_i, x_{-i}), \quad i \in N. \quad (\text{П2.3})$$

Содержательно в случае гарантирующего равновесия предполагается, что каждый агент рассчитывает на реализацию наихудшей для себя обстановки.

**Пример 2.** Выигрыши игрока Н заданы матрицей:

| Стратегии игрока Н | Стратегии игрока О |                |
|--------------------|--------------------|----------------|
|                    | О <sub>1</sub>     | О <sub>2</sub> |
| Н <sub>1</sub>     | 0,5                | 0,3            |
| Н <sub>2</sub>     | 0,4                | 0,6            |

В данной антагонистической игре игрок Н, перебирая строки, выбирает в каждой из них минимальное значение (полагая, что противник выберет свою

лучшую стратегию). Затем из худших (минимальных) значений (0,3 и 0,4) игрок Н выберет лучшее, т. е. будет применять стратегию  $H_2$ , гарантируя выигрыш 0,4 ( $v_1$ , нижняя цена игры).

Рассуждая аналогично, игрок О выберет стратегию  $O_1$ , гарантируя, что его проигрыш не будет выше 0,5 ( $v_2$ , верхняя цена игры).

В рассмотренном примере игроки выбрали так называемые *чистые стратегии* (даже в случае повторения игры ранее выбранные ими действия не меняются).

**Равновесие Нэша.** Определим многозначное отображение

$$BR(\theta, x) = (BR_1(\theta, x_{x-1}), BR_2(\theta, x_{x-2}), \dots, BR_n(\theta, x_{x-n})).$$

*Равновесием Нэша* в чистых стратегиях при состоянии природы  $\theta$  (точнее, *параметрическим равновесием Нэша*) называется точка  $x^*(\theta) \in X'$ , удовлетворяющая следующему условию:

$$x^*(\theta) \in BR(\theta, x^*(\theta)). \quad (\text{П2.4})$$

Последнее вложение можно также записать в виде:

$$\forall i \in N, \forall y_i \in X_i: f_i(\theta, x^*(\theta)) \geq f_i(\theta, y_i, x_{-i}^*(\theta)).$$

Множество  $E_N(\theta)$  равновесий Нэша можно описать следующим образом:

$$E_N(\theta) = \{x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X' \mid x_i \in BR_i(\theta, x_{-i}), i \in N\}.$$

Для реализации равновесия Нэша достаточно, чтобы рациональность агентов и все параметры игры, а также значение состояния природы были *общим знанием*, то есть каждый из агентов рационален, знает множество участников игры, целевые функции и допустимые множества всех агентов, а также значение состояния природы. Кроме того, он знает, что другие агенты знают это, а также то, что они знают, что он это знает, и так далее до бесконечности. Отказ от предположения об общем знании превращает игру в нормальной форме в рефлексивную игру (см. ниже).

Найденное в примере 2 решение не является равновесием игры (нижняя цена игры меньше верхней, см. [2; 3]). Чтобы найти равновесие, следует воспользоваться *смешанным расширением игры*, т. е. использовать *смешанные стратегии* – вероятностные распределения на множестве «обычных» (чистых) стратегий.

**Пример 3.** В условиях примера 2 найдем равновесие игры и оптимальные действия сторон.

Решая матричную антагонистическую игру  $2 \times 2$ , находим равновесие Нэша, заключающееся в том, что сторонам выгодно применять т.н. смешанные стратегии: игрок Н выбирает свою первую стратегию с вероятностью 0,75, а

игрок О – свою первую стратегию с вероятностью 0,5 (методы вычисления равновесия в смешанных стратегиях для биматричных игр, которое всегда существует, можно найти в [2, 3]). При этом значение игры (выигрыш первого игрока в равновесии антагонистической игры) будет 0,45. То есть, переход в область смешанных стратегий увеличивает выигрыш наступающей стороны с 0,4 до 0,45. Отметим, что в данном примере обороняющаяся сторона применяет мобильную оборону (условие одновременности принятия решений сторонами и, следовательно, использования равновесия Нэша).

Другие примеры нахождения равновесия Нэша представлены в разделах 4.3, 5.2 и 6.4 настоящей книги.

**Субъективное равновесие.** Рассмотренные виды равновесия являются частными случаями *субъективного равновесия*, которое определяется как вектор действий агентов, каждая компонента которого является наилучшим ответом соответствующего агента на ту обстановку игры, которая с его субъективной точки зрения может реализоваться. Рассмотрим возможные случаи.

Предположим, что  $i$ -й агент рассчитывает на реализацию обстановки игры  $\hat{x}_{-i}^B$  (« $B$ » обозначает *beliefs*; иногда используются термины «предположение», «догадка» – *conjecture*) и состояния природы  $\hat{\theta}_i$ , тогда он выберет

$$x_i^B \in BR_i(\hat{\theta}_i, \hat{x}_{-i}^B), i \in N. \quad (\text{П2.5})$$

Вектор  $x^B = (x_1^B, \dots, x_n^B)$  является точечным субъективным равновесием.

Отметим, что при таком определении «равновесия» не требуется *обоснованности* предположений агентов о действиях оппонентов, то есть может оказаться, что  $\exists i \in N: \hat{x}_{-i}^B \neq y_{-i}^B$ . Обоснованное субъективное равновесие, то есть такое, что  $\hat{x}_{-i}^B = y_{-i}^B, i \in N$ , является равновесием Нэша (для этого, в частности, достаточно, чтобы все параметры игры были общим знанием и чтобы каждый агент при построении  $\hat{x}_{-i}^B$  моделировал рациональное поведение оппонентов). В частном случае, если наилучший ответ каждого агента не зависит от предположений об обстановке, субъективное равновесие является равновесием в доминантных стратегиях.

В более общем случае  $i$ -й агент может рассчитывать на выбор оппонентами действий из множества  $X_{-i}^B \subseteq X_{-i}$  и реализацию состояния природы из множества  $\hat{\Omega}_i \subseteq \Omega, i \in N$ . Тогда наилучшим ответом будет *гарантирующее субъективное равновесие*:

$$x_i(X_{-i}^B, \hat{\Omega}_i) \in \text{Arg max}_{x_i \in X_i} \min_{x_{-i} \in X_{-i}^B} \min_{\theta \in \hat{\Omega}_i} f_i(\theta, x_i, x_{-i}), i \in N. \quad (\text{П2.6})$$

Если  $X_{-i}^B = X_{-i}$ ,  $\hat{\Omega}_i = \Omega$ ,  $i \in N$ , то  $x_i(X_{-i}^B) = x_i^c$ ,  $i \in N$ , то есть гарантирующее субъективное равновесие является «классическим» гарантирующим равновесием.

В еще более общем случае в качестве наилучшего ответа  $i$ -го агента можно рассматривать распределение вероятностей  $p_i(x_i)$ , где  $p_i(\cdot) \in \Delta(X_i)$  – множество всевозможных распределений на  $X_i$ , которое максимизирует ожидаемый выигрыш агента с учетом его представлений о распределении вероятностей  $\mu_i(x_{-i}) \in \Delta(X_{-i})$  действий, выбираемых другими агентами, и распределении вероятностей  $q_i(\theta) \in \Delta(\Omega)$  состояния природы (получим *Байесов принцип принятия решений*):

$$p_i(\mu_i(\cdot), q_i(\cdot)) \in \text{Arg} \max_{p_i \in \Delta(X_i)} \int_{X', \Omega} f_i(\theta, x_i, x_{-i}) p_i(x_i) q_i(\theta) \mu_i(x_{-i}) d\theta dx, \quad i \in N. \quad (\text{П2.7})$$

Таким образом, для реализации субъективного равновесия требуется минимальная информированность агентов: каждый из них должен знать свою целевую функцию  $f_i(\cdot)$  и допустимые множества  $\Omega$  и  $X'$ . Однако при такой информированности предположения агентов о состоянии природы и о поведении оппонентов могут быть *несогласованными*. Для достижения согласованности, то есть для того, чтобы предположения оправдывались, необходимы дополнительные предположения о взаимной информированности агентов. Наиболее сильным является предположение об общем знании, которое превращает субъективное точечное равновесие в равновесие Нэша, а совокупность Байесовых принципов принятия решений – в равновесие Байеса-Нэша.

**Равновесие Байеса-Нэша.** Если в игре имеется неполная информация, то *Байесова игра* описывается следующим набором:

- множеством  $N$  агентов;
- множеством  $K'$  возможных типов агентов, где тип  $i$ -го агента  $k_i \in K_i$ ,  $i \in N$ , вектор типов  $k = (k_1, \dots, k_n) \in K' = \prod_{i \in N} K_i$ ;
- множеством  $X' = \prod_{i \in N} X_i$  допустимых векторов действий агентов;
- набором функций полезности  $u_i: K' \times X' \rightarrow \mathbb{R}^1$ ;
- представлениями  $\mu_i(\cdot | k_i) \in \Delta(K_{-i})$ ,  $i \in N$ , агентов,

*Равновесие Байеса-Нэша* в игре с неполной информацией определяется как набор стратегий агентов вида  $\sigma_i: K_i \rightarrow X_i$ ,  $i \in N$ , которые максимизируют соответствующие ожидаемые полезности

$$U_i(k_i, \sigma_i(\cdot), \sigma_{-i}(\cdot)) = \int_{k_{-i} \in \prod_{j \neq i} K_j} u_i(k, \sigma_i(k_i), \sigma_{-i}(k_{-i})) \mu_i(k_{-i} | k_i) dk_{-i}, \quad i \in N. \quad (\text{П2.8})$$

В Байесовых играх, как правило, предполагается, что представления  $\{\mu_i(\cdot|\cdot)\}_{i \in N}$  являются общим знанием. Для этого, в частности, достаточно, чтобы они были *согласованы*, то есть выводились каждым из агентов по формуле Байеса из распределения  $\mu(k) \in \Delta(K')$ , которое является общим знанием.

Рассмотрим еще один класс игр (и связанных с ним равновесий), в которых стороны принимают решения одновременно.

### Рефлексивные игры

Рассмотрим игру, в которой участвуют агенты из множества  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ . Если в ситуации присутствует неопределенный параметр  $\theta \in \Omega$ , то *структура информированности*  $I_i$  (как синоним будем употреблять термины «*информационная структура*» и «*иерархия представлений*»)  $i$ -го агента включает в себя следующие элементы [11; 12]. Во-первых, представление  $i$ -го агента о параметре  $\theta$  – обозначим его  $\theta_i$ ,  $\theta_i \in \Omega$ . Во-вторых, представления  $i$ -го агента о представлениях других агентов о параметре  $\theta$  – обозначим их  $\theta_{ij}$ ,  $\theta_{ij} \in \Omega$ ,  $j \in N$ . В-третьих, представления  $i$ -го агента о представлении  $j$ -го агента о представлении  $k$ -го агента – обозначим их  $\theta_{ijk}$ ,  $\theta_{ijk} \in \Omega$ ,  $j, k \in N$ . И так далее.

Таким образом, структура информированности  $I_i$   $i$ -го агента задается набором всевозможных значений вида  $\theta_{i_1 \dots i_l}$ , где  $l$  пробегает множество целых неотрицательных чисел,  $j_1, \dots, j_l \in N$ , а  $\theta_{i_1 \dots i_l} \in \Omega$ .

Аналогично задается *структура информированности*  $I$  игры в целом – набором значений  $\theta_{i_1 \dots i_l}$ , где  $l$  пробегает множество целых неотрицательных чисел,  $i_1, \dots, i_l \in N$ , а  $\theta_{i_1 \dots i_l} \in \Omega$ . Подчеркнем, что структура информированности  $I$  «недоступна» наблюдению агентов, каждому из которых известна лишь некоторая ее часть (а именно –  $I_i$ ). Таким образом, структура информированности – бесконечное  $n$ -дерево (то есть тип структуры постоянен и является  $n$ -деревом), вершинам которого соответствует конкретная информированность реальных и фантомных агентов.

*Рефлексивной игрой*  $\Gamma_I$  называется игра, описываемая следующим кортежем [11] (термин «рефлексивная игра введен В.А. Лефевром [8]):

$$\Gamma_I = \{N, (X_i)_{i \in N}, f_i(\cdot)_{i \in N}, \Omega, I\}, \quad (\text{П2.9})$$

где  $N$  – множество реальных агентов,  $X_i$  – множество допустимых действий  $i$ -го агента,  $f_i(\cdot): \Omega \times X' \rightarrow \mathfrak{R}^1$  – его целевая функция,  $i \in N$ ,  $\Omega$  – множество возможных значений неопределенного параметра,  $I$  – структура информированности.

Подчеркнем, что все элементы рефлексивной игры кроме структуры информированности являются *общим знанием* среди агентов, то есть

- 1) эти элементы известны всем агентам;
- 2) всем агентам известно 1);
- 3) всем агентам известно 2)

и так далее до бесконечности.

Далее для формулировки некоторых определений и свойств понадобятся следующие обозначения:

$\Sigma_+$  – множество всевозможных конечных последовательностей индексов из  $N$ ;

$\Sigma$  – объединение  $\Sigma_+$  с пустой последовательностью;

$|\sigma|$  – количество индексов в последовательности  $\sigma$  (для пустой последовательности принимается равным нулю), которое выше было названо длиной последовательности индексов.

Если  $\theta_i$  – представления  $i$ -го агента о неопределенном параметре, а  $\theta_{ii}$  – представления  $i$ -го агента о собственном представлении, то естественно считать, что  $\theta_{ii} = \theta_i$ . Иными словами,  $i$ -й агент правильно информирован о собственных представлениях, а также считает, что таковы и другие агенты и т. д. Формально это означает, что выполнена *аксиома автоинформированности*, которую далее будем предполагать выполненной:  $\forall i \in N \forall \tau, \sigma \in \Sigma: \theta_{i\tau\sigma} = \theta_{i\sigma}$ .

Эта аксиома означает, в частности, что, зная  $\theta_\tau$  для всех  $\tau \in \Sigma_+$ , таких что  $|\tau| = \gamma$ , можно однозначно найти  $\theta_\tau$  для всех  $\tau \in \Sigma_+$ , таких что  $|\tau| < \gamma$ .

Наряду со структурами информированности  $I_i$ ,  $i \in N$ , можно рассматривать структуры информированности  $I_{ij}$  (структура информированности  $j$ -го агента в представлении  $i$ -го агента),  $I_{ijk}$  и т. д. Отождествляя структуру информированности с характеризуемым ею агентом, можно сказать, что, наряду с  $n$  реальными агентами ( $i$ -агентами, где  $i \in N$ ) со структурами информированности  $I_i$ , в игре участвуют *фантомные агенты* ( $\tau$ -агенты, где  $\tau \in \Sigma_+$ ,  $|\tau| \geq 2$ ) со структурами информированности  $I_\tau = \{\theta_{\tau\sigma}\}$ ,  $\sigma \in \Sigma$ , существующие в сознании реальных агентов.

Определим фундаментальное для дальнейших рассмотрений понятие тождественности структур информированности. Структуры информированности  $I_\lambda$  и  $I_\mu$  ( $\lambda, \mu \in \Sigma_+$ ) называются *тождественными*, если выполнены два условия:

- 1)  $\theta_{\lambda\sigma} = \theta_{\mu\sigma}$  для любого  $\sigma \in \Sigma$ ;
- 2) последние индексы в последовательностях  $\lambda$  и  $\mu$  совпадают.

Будем обозначать тождественность структур информированности следующим образом:  $I_\lambda = I_\mu$ .

Понятие тождественности структур информированности позволяет определить их важное свойство – сложность. Заметим, что наряду со структурой  $I$  имеется счетное множество структур  $I_\tau$ ,  $\tau \in \Sigma_+$ , среди которых можно при помощи отношения тождественности выделить классы попарно нетождественных структур. Количество этих классов естественно считать *сложностью структуры информированности*.

Говорят, что структура информированности  $I$  имеет *конечную сложность*  $\nu = \nu(I)$ , если существует такой конечный набор попарно нетождественных структур  $\{I_{\tau_1}, I_{\tau_2}, \dots, I_{\tau_\nu}\}$ ,  $\tau_l \in \Sigma_+$ ,  $l \in \{1, \dots, \nu\}$ , что для любой структуры  $I_\sigma$ ,  $\sigma \in \Sigma_+$ , найдется тождественная ей структура  $I_{\tau_l}$  из этого набора. Если такого конечного набора не существует, будем говорить, что структура  $I$  имеет бесконечную сложность:  $\nu(I) = \infty$ .

Структуру информированности, имеющую конечную сложность, называют *конечной* (еще раз отметим, что при этом дерево структуры информированности все равно остается бесконечным). В противном случае структуру информированности будем называть *бесконечной*.

Ясно, что минимально возможная сложность структуры информированности в точности равна числу участвующих в игре реальных агентов (напомним, что по определению тождественности структур информированности они попарно различаются у реальных агентов).

Любой набор (конечный или счетный) попарно нетождественных структур  $I_\tau$ ,  $\tau \in \Sigma_+$ , такой что любая структура  $I_\sigma$ ,  $\sigma \in \Sigma_+$ , тождественна одной из них, называют *базисом* структуры информированности  $I$ .

Если структура информированности  $I$  имеет конечную сложность, то можно определить максимальную длину последовательности индексов  $\gamma$ , такую что, зная все структуры  $I_\tau$ ,  $\tau \in \Sigma_+$ ,  $|\tau| = \gamma$ , можно найти и все остальные структуры. Эта длина в определенном смысле характеризует ранг рефлексии, необходимый для описания структуры информированности.

Структура информированности  $I$ ,  $\nu(I) < \infty$ , имеет *конечную глубину*  $\gamma = \gamma(I)$ , если

1) для любой структуры  $I_\sigma$ ,  $\sigma \in \Sigma_+$ , найдется тождественная ей структура  $I_\tau$ ,  $\tau \in \Sigma_+$ ,  $|\tau| \leq \gamma$ ;

2) для любого целого положительного числа  $\xi$ ,  $\xi < \gamma$ , существует структура  $I_\sigma$ ,  $\sigma \in \Sigma_+$ , не тождественная никакой из структур  $I_\tau$ ,  $\tau \in \Sigma_+$ ,  $|\tau| = \xi$ .

Если  $\nu(I) = \infty$ , то и глубину считают бесконечной:  $\gamma(I) = \infty$ .

Понятия сложности и глубины структуры информированности игры можно рассматривать  $\tau$ -субъективно. В частности, глубина структуры информированности игры с точки зрения  $\tau$ -агента,  $\tau \in \Sigma_+$ , называется *рангом рефлексии  $\tau$ -агента*.

Если задана структура  $I$  информированности игры, то тем самым задана и структура информированности каждого из агентов (как реальных, так и фантомных). Выбор  $\tau$ -агентом своего действия  $x_\tau$  в рамках гипотезы рационального поведения определяется его структурой информированности  $I_\tau$ , поэтому, имея перед собой эту структуру, можно смоделировать его рассуждения и определить это его действие. Выбирая свое действие, агент моделирует действия других агентов (осуществляет рефлексию). Поэтому при определении исхода игры необходимо учитывать действия как реальных, так и фантомных агентов.

Набор действий  $x_\tau^*$ ,  $\tau \in \Sigma_+$ , называют *информационным равновесием* [11], если выполнены следующие условия:

- 1) структура информированности  $I$  имеет конечную сложность  $\nu$ ;
- 2)  $\forall \lambda, \mu \in \Sigma \quad I_{\lambda i} = I_{\mu i} \Rightarrow x_{\lambda i}^* = x_{\mu i}^*$ ;
- 3)  $\forall i \in N, \forall \sigma \in \Sigma$

$$x_{\sigma i}^* = \text{Arg max}_{x_i \in X_i} f_i(\theta_{\sigma i}, x_{\sigma i 1}^*, \dots, x_{\sigma i, i-1}^*, x_i, \dots, x_{\sigma i, n}^*). \quad (\text{П2.10})$$

Первое условие в определении информационного равновесия означает, что в рефлексивной игре участвует конечное число реальных и фантомных агентов.

Второе условие отражает требование того, что одинаково информированные агенты выбирают одинаковые действия.

И наконец, третье условие отражает рациональное поведение агентов – каждый из них стремится выбором собственного действия максимизировать свою целевую функцию, подставляя в нее действия других агентов, которые оказываются рациональными с точки зрения рассматриваемого агента в рамках имеющихся у него представлений о других агентах.

Удобным инструментом исследования информационного равновесия является *граф рефлексивной игры*, в котором вершины соответствуют реальным и фантомным агентам, и в каждую вершину-агента входят дуги (их число на единицу меньше числа реальных агентов), идущие из вершин-агентов, от действий которых в субъективном равновесии зависит выигрыш данного агента.

**Пример 4.** Пусть в ситуации участвуют две стороны ( $A$  и  $B$ ) и агент, который, будучи высокопоставленным военным руководителем стороны  $A$

является одновременно осведомителем стороны  $B$ , о чем стороне  $A$  неизвестно [12]. Граф рефлексивной игры описанной ситуации изображен на рисунке П.2.1. Вершинам графа соответствуют следующие реальные и фантомные агенты: 1 – сторона  $A$ ; 2 – сторона  $B$ ; 3 – агент; 12 – сторона  $B$ , которая воспринимает агента как верного стороне  $A$ ; 13 – агент, верный стороне  $A$ .

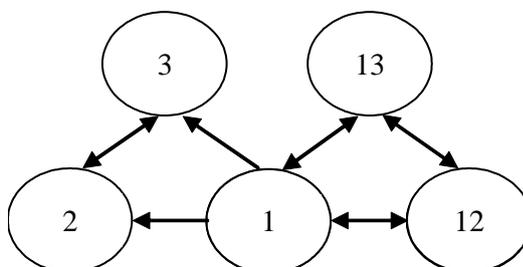


Рис. П.2.1. Граф рефлексивной игры в примере 4

Неопределенным параметром здесь будет представление о том, кем на самом деле является агент, т. е.  $\Omega = \{v, ш\}$  (верный и шпион).

Одной из особенностей «классического» равновесия Нэша является его самоподдерживающийся характер – если игра повторяется несколько раз, и все игроки кроме  $i$ -го выбирают одни и те же равновесные действия, то и  $i$ -му нет резона отклоняться от своего равновесного действия. Это обстоятельство очевидным образом связано с тем, что представления всех игроков о реальности адекватны – значение состояния природы является общим знанием.

В случае информационного равновесия ситуация, вообще говоря, может быть иной. Действительно, в результате однократного разыгрывания игры может оказаться, что какие-то из игроков (или даже все) наблюдают не тот результат, на который они рассчитывали. Это может быть связано как с неверным представлением о состоянии природы, так и с неадекватной информированностью о представлениях оппонентов. В любом случае самоподдерживающийся характер равновесия нарушается – если игра повторяется, то действия игроков могут измениться [12].

Многочисленные примеры прикладных моделей рефлексивных игр и информационного управления приведены в [11; 12; 15] и в разделе 4.3.5.

### Иерархические игры

Если в рассматриваемых до сих пор моделях игровой неопределенности предполагалось, что игроки (агенты) выбирают свои стратегии одновременно и однократно, то в *иерархических играх* [4; 5; 7] существует фиксированный порядок ходов – первый ход делает центр, затем свои стратегии выбирают

агенты. С этой точки зрения иерархические игры являются наиболее адекватным аппаратом описания задач управления организационными системами (учитывается возможность передачи информации между игроками).

При моделировании боевых и специальных действий часто возникают ситуации, когда в силу тех или иных причин (разные продолжительности циклов действий, асимметричность информации) действия первого игрока наблюдаются вторым игроком. Тогда первый игрок (преднамеренная оборона, правоохранные структуры и т. д.) делает ход первым, а второй игрок выбирает свое действие с учетом выбранного действия первого игрока.

Критерии эффективности (целевые функции) первого и второго игроков обозначим  $w_1 = f(x, y)$  и  $w_2 = g(x, y)$  соответственно. Выигрыши игроков зависят от их *действий*  $x$  и  $y$  из множеств действий  $X, Y$ .

Во всех моделях иерархических игр считается, что *первый игрок (центр, лидер)* имеет право первого хода. Его ход состоит в выборе *стратегии*  $\tilde{x}$ . Понятие стратегии существенно отличается от понятия действия и тесно связано с информированностью первого игрока о поведении *второго игрока – агента*. Под стратегией игрока здесь и далее понимается правило его поведения, то есть правило выбора конкретного действия в зависимости от содержания и конкретного значения той информации, которую он получит в процессе игры.

Самая простая стратегия центра состоит в выборе непосредственно действия  $x$  (если поступления дополнительной информации о действии агента в процессе игры не ожидается, что характерно при моделировании боевых и специальных действий – т.н. игра  $\Gamma_1$  [4]), более сложная – в выборе функции  $\tilde{x}(y)$  (если в процессе игры ожидается информация о действии агента, т. е. при моделировании организационных систем – т.н. игра  $\Gamma_2$  [4], являющаяся более выгодной для первого игрока). Стратегия центра может также состоять в сообщении агенту некоторой информации, например, о планах своего поведения в зависимости от выбора агентом действия. При этом агент должен быть уверен, что первый игрок может реализовать эту стратегию, то есть что первый игрок будет точно знать реализацию действия  $y$  на момент выбора своего действия  $x$ .

Рассмотрим ситуацию, в которой первый игрок не имеет информации о выборе стратегии вторым игроком, тогда как второй игрок наблюдает (или может наблюдать) действия первого.

Пара действий  $(x^*, y^*)$  в рассматриваемой игре называется *равновесием Штакельберга* (в англоязычной литературе – *сильным равновесием Штакельберга*), если:

$$x^* \in \text{Arg max}_{x \in X} \max_{y \in R(x)} f(x, y), \quad (\text{П2.11})$$

$$y^* \in R(x^*) = \text{Arg max}_{y \in Y} g(x^*, y), \quad (\text{П2.12})$$

то есть  $R(x)$  – функция наилучшего ответа агента на действие центра (первого игрока). В выражении (П.2.11) предполагается, что из множества (П.2.12) максимумов своей целевой функции второй игрок выберет стратегию, наиболее выгодную для первого – см.  $\max_{y \in R(x)}$ , т. е. выполняется *гипотеза благожелательности*).

В военных системах и системах обеспечения безопасности эта гипотеза не работает (скорее, наоборот), поэтому равновесие в иерархической игре определяют так (игра  $\Gamma_1$  [4; 7], в англоязычной литературе – *слабое равновесие Штакельберга*):

$$x^* \in \text{Arg max}_{x \in X} \min_{y \in R(x)} f(x, y).$$

Очевидно, в случае, когда множество (П2.12) состоит из одной точки, равновесия Штакельберга и  $\Gamma_1$  совпадают. Примеры игр типа  $\Gamma_1$  представлены в разделе 7.2.

Разработка теоретико-игровых моделей боевых и специальных действий является искусством и требует владения математическим аппаратом теории игр, а также знания основных положений военной науки и военного искусства.

## Литература к Приложению 2

1. Васин А. А. Модели динамики коллективного поведения. – М.: МГУ, 1989. – 156 с.
2. Васин А. А., Морозов В. В. Теория игр и модели математической экономики: учебное пособие. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 272 с.
3. Вентцель Е. С. Исследование операций. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.
4. Гермейер Ю. Б. Игры с противоположными интересами. – М.: Наука, 1976. – 327 с.
5. Горелик В. А., Горелов М. А., Кононенко А. Ф. Анализ конфликтных ситуаций в системах управления. – М.: Радио и связь, 1991. – 288 с.
6. Губко М. В., Новиков Д. А. Теория игр в управлении организационными системами. – М.: Синтег, 2002. – 148 с.
7. Кукушкин Н. С., Морозов В. В. Теория неантагонистических игр. – М.: МГУ, 1984. – 104 с.
8. Лефевр В. А. Конфликтующие структуры. – М.: Советское радио, 1973. – 158 с.

9. *Малишевский А. В.* Качественные модели в теории сложных систем. – М.: Физматлит, 1998. – 528 с.
10. *Мулен Э.* Кооперативное принятие решений: аксиомы и модели. – М.: Мир, 1991. – 464 с.
11. *Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г.* Рефлексивные игры. – М.: Синтег, 2003. – 160 с.
12. *Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г.* Рефлексия и управление: математические модели. – М.: Физматлит, 2013. – 412 с.
13. *Опоицев В. И.* Равновесие и устойчивость в моделях коллективного поведения. – М.: Наука, 1977. – 248 с.
14. *Петросян Л. А., Зенкевич Н. А., Семина Е. А.* Теория игр. – М.: Высшая школа, 1998. – 304 с.
15. *Чхартишвили А. Г.* Теоретико-игровые модели информационного управления. – М.: ПМСОФТ, 2004. – 227 с.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ**

АА – армейская авиация  
АНПА – автономный необитаемый подводный аппарат  
АСУВ – автоматизированная система управления войсками (силами)  
БАК – боевой авиационный комплекс  
БГ – боевая группа  
БЛА (БПЛА) – беспилотный летательный аппарат  
ВВП – валовый внутренний продукт  
ВВТ – вооружение и военная техника  
ВВСТ – вооружение, военная и специальная техника  
ВКО – воздушно-космическая оборона  
ВМС – военно-морские силы  
ВМФ – военно-морской флот  
ВТА – военно-транспортная авиация  
ГАК – гидроакустический комплекс  
ГАС – гидроакустическая станция  
ГИС – геоинформационная система  
ГИСИС – Глобальная интегрированная система информации о судоходстве  
ГКО – Государственный комитет обороны  
ГПД – гидроакустическое противодействие  
ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли  
ДРГ – диверсионно-разведывательная группа  
ДРЛО – самолет дальнего радиолокационного обнаружения  
ЗРВ – зенитно-ракетные войска  
ЗРК – зенитный ракетный комплекс  
ЗРПК – зенитный ракетно-пушечный комплекс  
ИА – истребительная авиация  
ИИ – искусственный интеллект  
ИНС – искусственные нейронные сети  
ИПБ – игра полковника Блотто  
ИСУ – интеллектуальная система управления  
ИЭЗ – исключительная экономическая зона

ККМ – комплекс математических моделей  
КСП – контрольно-следовая полоса  
ЛА – летательный аппарат  
ЛП – линейное программирование  
ЛПР – лицо, принимающее решения  
МАС – мультиагентные системы  
МГП – международное гуманитарное право  
МПО – морской подводный объект  
НВДНГ – направление вероятных действий нарушителей границы  
НГУ – направление главного удара  
НОАК – Народно-освободительная армия Китая  
НСОУ – направление сосредоточения основных усилий  
ОГАС – опускаемая гидроакустическая станция  
ОП – опорный пункт  
ОПИОВ – отдел по использованию опыта войны  
ОРД – оперативно-разыскная деятельность  
ПВО – противовоздушная оборона  
ПО – подвижный объект  
ПН – пропорциональная навигация  
ПНВ – прибор ночного видения  
ПРО – противоракетная оборона  
ПС – проблемная ситуация  
ПТЗ – противоторпедная защита  
ПТРК – противотанковый ракетный комплекс  
РГАС – радиогидроакустическая станция  
РДС – равновесие в доминирующих стратегиях  
РЛС – радиолокационная станция  
РТВ – радиотехнические войска  
РЭБ – радиоэлектронная борьба  
САУ – самоходная артиллерийская установка  
СВН – средства воздушного нападения  
СВО – специальная военная операция на Украине  
СВУ – самодельное взрывное устройство  
СИУ ТО – система интеллектуального управления торпедным оружием  
СМО – система массового обслуживания  
ССН – система самонаведения  
ТВД – театр военных действий

ТТХ – тактико-технические характеристики

УПОИОВ – управление по обобщению и использованию опыта войны

ЭДЦ – элементы движения цели

ЭС – экспертная система

A2/AD (anti-access and area denial) – зона воспреещения доступа и маневра

ССА – collaborative combat aircraft (боевой самолет совместного применения)

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Аберкромби Н., Хилл С., Тернер Б.* Социологический Словарь. 2-е изд., перераб. и доп. / Пер. с англ. И. Г. Ясавеева, под ред. С. А. Ерофеева. – М.: Экономика, 2004. – 620 с.
2. *Абрамов Н. С., Макаров Д. А., Талалаев А. А., Фраленко В. П.* Современные методы интеллектуальной обработки данных ДЗЗ // Программные системы: теория и приложения. – 2018. – Т. 9, № 4 (39). – С. 417-442.
3. *Абрамовская Т. В., Петров Н. Н.* Теория гарантированного поиска на графах // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2013. – № 2. – С. 3-39.
4. *Абрамянц Т. Г.* Уклонение подводного объекта от обнаружения разнородными средствами при малых отношениях сигнал – помеха / Абрамянц Т.Г., Галяев А.А., Маслов Е.П., Рудько И.М., Яхно В.П., Гурьев Ю.В., Якушенко Е.И. // Сборник научных трудов ВМИИ. – 2011. – №4. – С. 12-38.
5. *Абрамянц Т. Г., Маслов Е. П., Рубинович Е. Я.* Простейшая дифференциальная игра поочередного преследования // Автоматика и телемеханика. – 1980. – №2. – С. 5–15.
6. *Абрамянц Т. Г., Маслов Е. П., Яхно В. П.* Уклонение подвижного объекта от обнаружения группой наблюдателей // Проблемы управления. – 2010. – №5. – С. 73–79.
7. *Абчук В. А., Суздаль В. Г.* Поиск объектов. – М.: Сов. радио, 1977. –334 с.
8. *Абчук В. А., Матвейчук Ф. А., Томашевский Л. П.* Справочник по исследованию операций / под общ. ред. Ф. А. Матвейчука. – М.: Воениздат, 1979. – 368 с.
9. *Авдийский В. И., Безденежных В. М.* Неопределенность, изменчивость и противоречивость в задачах анализа рисков поведения экономических систем // Эффективное антикризисное управление. – 2011. – № 3. – С. 46-61.
10. *Авербух Ю. В.* Минимаксный подход к играм среднего поля // Математический сборник. – 2015. – Т. 206, № 7. – С. 3–32.
11. *Аверченко С. В., Белоусов В. В.* Беспилотные летательные аппараты в военных конфликтах второй половины XX - начала XXI веков: основные вехи истории // Современная научная мысль. – 2023. – № 1. – С. 231-242.
12. *Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра: монография / Под ред. Е. А. Федосова.* – 2-е изд., стереотип. – М.: Дрофа, 2004. – 816 с.
13. *Айзекс Р.* Дифференциальные игры. – М.: «Мир», 1967. – 479 с.
14. *Акофф Р. Л.* Основы исследования операций / Р. Л. Акофф, М. В. Сасиени; пер. с англ. и предисл. В. Я. Алтаева; под ред. И. А. Ушакова. – М.: Мир, 1971. – 534 с.
15. *Акофф Р. Л.* Искусство решения проблем. – М.: Мир, 1982. – 230 с.
16. *Аксенов К. А., Гончарова Н. В.* Моделирование и принятие решений в организационно- технических системах: учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 104 с.
17. *Алексеев В. М., Тихомиров В. М., Фомин С. В.* Оптимальное управление. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 384 с.

18. *Амелькин В. В.* Дифференциальные уравнения в приложениях. – М.: Наука, 1987. – 188 с.
19. Анализ сложных систем: Методология анализа при подготовке военных решений / Под ред. Э. Квейда. – М.: Сов. радио, 1969. – 520 с.
20. *Андреанов Д. Л., Гребнев М. И.* Обзор методов агрегирования производственных функций // Управление экономическими системами. – 2015. – №1 (73). – С. 1-4.
21. *Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э.* Теория колебаний. – 2-е изд., перераб. и испр. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1959. – 918 с.
22. *Андронов А. А., Хайкин С. Э.* Теория колебаний. – Ч. 1. – М., Л.: ОНТИ, 1937. – 460 с.
23. *Ансофф И.* Стратегическое управление. – М.: Экономика, 1989. – 519 с.
24. *Анцелович Л. Л.* Надежность, безопасность и живучесть самолета: учебник. – М.: Машиностроение, 1985 – 296 с.
25. *Арзуманян Р. В.* Теория и принципы сетецентричных войн и операций // 21-й век. – 2008. – №2 (8). – С. 66-127.
26. *Арнольд В. И.* «Жесткие» и «мягкие» математические модели. – М.: МЦНМО, 2000. – 32 с.
27. *Арриги Дж.* Долгий двадцатый век: Деньги, власть и истоки нашего времени. – М.: Издательский дом «Территория будущего», 2006. – 472 с.
28. *Аршинов В. И., Буданов В. Г.* Концепция постнеклассической науки В. С. Стёпина и универсальный эволюционизм Н. Н. Моисеева // Филос. науки / Russ. J. Philos. Sci. – 2019. – № 62 (4). – С. 96-112.
29. *Ахременко А. С.* Сценариотехника в аналитическом обеспечении процедуры принятия политических решений // Вестник Московского университета. Серия 12. Политические науки. – 1997. – № 5. – С. 93-107.
30. *Ахромов Д. Е., Брагилевский И. Л., Валеев М. Г.* Методологический подход к обоснованию рационального состава и построения группировки войск сил противовоздушной обороны в приморском районе // Военная мысль. – 2018. – № 10. – С. 63-69.
31. *Бакут П. А.* Обнаружение движущихся объектов / П. А. Бакут, Ю. В. Жулина, Н. А. Иванчук; под общ. ред. П. А. Бакута. – М.: Сов. радио, 1980. – 287 с.
32. Баланс сил в ключевых регионах мира: концептуализация и прикладной анализ: монография / под ред. Д. А. Дегтерева, М. А. Никулина, М. С. Рамича. – М.: РУДН, 2021. – 319 с.
33. *Балацкий Е. В.* Россия в эпицентре геополитической турбулентности: накопление глобальных противоречий // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2022. – Т. 15. – № 4. – С. 42–59.
34. *Балацкий Е. В.* Россия в эпицентре геополитической турбулентности: признаки будущего доминирования // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2022. – Т. 15. – № 5. – С. 33–54.
35. *Балацкий Е. В.* Эрозия институтов и экономический рост // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2023. – Т. 16. – № 3. – С. 81–101.
36. *Балацкий Е. В.* Американская модель глобального доминирования // Terra Economicus. – 2024. – № 22(2). – С. 96–113.

37. Балацкий Е. В., Екимова Н. А. Антихрупкость национальной экономики: эвристическая оценка // *Journal of New Economy*. – 2023. – Т. 24. – № 2. – С. 28-49.
38. Барвиненко В. В., Аношко Ю. Г. Еще раз о показателях и критериях // *Воздушно-космическая оборона*. – 2014. – № 3 (76). – С. 28-39.
39. Баренблатт Г. И. Динамика турбулентных пятен и интрузии в устойчиво стратифицированной жидкости // *Изв. АН СССР, ФАО*. – 1978. – №2. – С. 195-206.
40. Басаева Е. К., Каменецкий Е. С., Хосаева З. Х. Прогнозирование социально-политической нестабильности (на примере Арабской весны) // *Социологические исследования*. – 2022. – № 10. – С. 96-106.
41. Баяндина Т. А. Динамика полета самолета. Расчет траекторий и летных характеристик: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2023. – 152 с.
42. Беккер Г. С. Человеческое поведение: экономический подход. Избранные труды по экономической теории / пер. с англ. Е. В. Батракова. – М.: ВШЭ, 2003. – 671 с.
43. Беллман Р. Э. Динамическое программирование / под ред. Н. Н. Воробьева. – М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1960. – 400 с.
44. Беллман Р. Э., Дрейфус С. Э. Прикладные задачи динамического программирования / под ред. А. А. Первозанского. – М.: Наука, 1965. – 459 с.
45. Белов М. В., Новиков Д. А. Методология комплексной деятельности. – М.: ЛЕНАНД, 2018. – 320 с.
46. Белов М. В., Новиков Д. А. Модели опыта // *Проблемы управления*. – 2021. – № 1. – С. 43–60.
47. Беляев В. С. О затухании турбулентности в пятне при его растекании в устойчиво стратифицированной жидкости // *Океанология*. – 1981. – Вып.3. – С. 435-440.
48. Белякович Н. Н. Сценарийтехника как метод политического прогнозирования // *Право и демократия. Сб. научных трудов Белорусского гос. ун-та*. – 2002. – Вып. 12. – С. 3-8.
49. Бернулли Д. Опыт новой теории измерения жребия. // *Вехи экономической мысли: В 3-х т. – Т.1. Теория потребительского поведения и спроса*. – СПб: Экономическая школа, 1999. – С. 11–27.
50. Бессонов В. А. Проблемы построения производственных функций в российской переходной экономике. - В кн. Бессонов В.А., Цухло С.В. Анализ динамики российской переходной экономики. – М.: Институт экономики переходного периода, 2002. – С. 5-89.
51. Блюх И. С. Будущая война в техническом, экономическом и политическом отношениях. – В 6-ти т. – СПб: тип. И.А. Ефрона, 1898.
52. Бобылев П. Н. Репетиция катастрофы // *Военно-исторический журнал*. – 1993. – № 6. – С. 10-16.
53. Богданов О. А., Смирнов А. А., Ковалев Д. В. Имитационное моделирование противоборства в воздушно-космической сфере // *Программные продукты и системы*. – 2016. – № 1(113). – С. 160-165.
54. Боевое применение и боевая эффективность авиационных комплексов войск ПВО страны / Под общ. ред. В. И. Абрамова. – М.: Воениздат, 1979. – 520 с.

55. Боевые авиационные комплексы и их эффективность: учебник для слушателей и курсантов инженерных вузов ВВС / Под ред. О. В. Болховитинова. – М.: Изд. ВВИА, 2008. – 224 с.
56. *Бойко А. А.* Способ аналитического моделирования боевых действий // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. - № 2. – С. 1-27.
57. *Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Понтрягин Л. С.* К теории оптимальных процессов // Доклады АН СССР. – 1956. – Том 110, № 1. – С. 7-10.
58. Большая Российская Энциклопедия (БРЭ) – электронная версия. – URL: <https://bigenc.ru/> (дата обращения: 10.12.2023).
59. Большая Советская Энциклопедия (БСЭ). – В 30 т. / Гл. ред. А. М. Прохоров. – 3-е изд. – М.: Сов. энциклопедия, 1969–1978.
60. Большой энциклопедический словарь / Ред. А. М. Прохоров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Большая Российская энциклопедия, 2000. – 1456 с.
61. *Боярский В. И.* Партизанство вчера, сегодня, завтра Историко-документальный очерк. – М.: Издательский дом «Граница», 2003. – 95 с.
62. *Бреер В. В.* Пороговые модели боевых действий // Управление большими системами. – 2020. – Вып. 84. – С. 35-50.
63. *Бреер В. В., Новиков Д. А., Рогаткин А. Д.* Управление толпой: математические модели порогового коллективного поведения. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 168 с.
64. *Булыгин С. Б., Чеботарь И. В., Копичев О. А.* Единая система моделирования военных действий для подготовки специалистов различного профиля // Военная мысль. – 2021. – №5. – С. 131-139.
65. *Буравлев А. И.* К вопросу об оценке могущества государства // Вооружение и экономика. – 2016. – № 1 (34). – С. 20-32.
66. *Бусленко Н. П.* Моделирование сложных систем. – М: Наука, 1978. – 400 с.
67. *Буянов Б. Б., Лубков Н. В., Поляк Г. Л.* Система поддержки принятия управленческих решений с применением имитационного моделирования // Проблемы управления. – 2006. – № 6. – С. 43–49.
68. *Вайсборд Э. М., Жуковский В. И.* Введение в дифференциальные игры нескольких лиц и их приложения. – М.: Советское радио, 1980. – 304 с.
69. *Ванько В. И., Ермошина О. В., Кувыркин Г. Н.* Вариационное исчисление и оптимальное управление / под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – 3-е изд., испр. – М.: МГТУ, 2006. – 488 с.
70. *Васильев С. Н.* Совместное использование мехатронных систем для организации эффективного противодействия скоординированному действию торпед противника / Васильев С. Н., Галяев А. А., Залетин В. В., Кулаков К. С., Сильников М. В., Якушенко Е. И. // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – Т. 23, № 4. – С. 197-208.
71. *Васильев С. К., Захаров В. Н., Прохоров Ю. Ф.* Кибернетика в системах военного назначения. – М.: Воениздат, 1979. – 263 с.
72. *Васин А. А.* Модели динамики коллективного поведения. – М.: МГУ, 1989. – 156 с.
73. *Васин А. А.* Эволюционные и повторяющиеся игры. – М.: РЭШ, 2005. – 74 с.
74. *Васин А. А., Морозов В. В.* Теория игр и модели математической экономики (учебное пособие). – М.: МАКС Пресс, 2005. – 272 с.
75. *Васин А. А., Цыганов Н. И.* Динамическая вероятностная модель двустороннего боя // Прикладная математика и информатика. Труды факультета ВМК МГУ им. М.В. Ломоносова. – 2021. – Т. 67. – С. 66-88.

76. Великая Отечественная война 1941–1945 гг. Кампании и стратегические операции в цифрах. – В 2 томах. – М.: Объединенная редакция МВД России, 2010. – Т. I. – 608 с. – Т. II. – 784 с.
77. Великая Отечественная война. Юбилейный статистический сборник. – М.: Росстат, 2020. – 299 с.
78. *Вентцель Е. С.* Введение в исследование операций. – М.: Советское радио, 1964. – 388 с.
79. *Вентцель Е. С.* Исследование операций. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.
80. *Вентцель Е. С.* Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Наука, 1988. – 206 с.
81. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей: учеб. для вузов. – 10-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2006. – 575 с.
82. *Верещагин В. В.* Скобелев. Воспоминания о Русско-Турецкой войне 1877—1878 гг. – М.: «ДАРЪ», 2007. – 496 с.
83. *Викторова В. С., Степанянц А. С.* Модели и методы расчета надежности технических систем. – 2-е изд., испр. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 256 с.
84. *Вильямс Т., Анкер К., Бхашиям Н. и др.* Стохастические дуэли. Сборник материалов. – М., 1969. – 70 с.
85. *Винер Н.* Кибернетика и общество. – М.: Изд-во иностр. лит., 1958. – 200 с. / Wiener N. The Human Use of Human Beings; Cybernetics and Society. – Boston: Houghton Mifflin Company, 1950. – 200 p.
86. *Винокуров Г. Н., Коняхин Б. А., Подкорытов Ю. А.* Геополитический статус Китая как фактор российской политики ядерного сдерживания Соединенных Штатов // Стратегическая стабильность. – 2008. – № 2. – С. 49-53.
87. Военная география и военная статистика: история и современность / составители: Н. Ю. Бринюк, Э. Л. Коршунов. – СПб.: Дмитрий Буланин, 2018. – 320 с.
88. Военная доктрина Российской Федерации. – Утверждена Президентом РФ 25.12.2014 № Пр-2976.
89. Военная энциклопедия. В 8 томах. – М.: Воениздат, 1997-2004.
90. Военное дело. Энциклопедический словарь Ф.А. Брокгауза и И.А. Ефрона / Редактор-сост. И.Е. Арясов. – М.: Вече, 2006. – 640 с.
91. *Волгин Н. С.* Прикладные задачи исследования операций. Часть 2. Сборник решений: Учебное пособие / Н. С. Волгин, Н. В. Махров, В. А. Юровский. – Л.: ВМА, 1976. – 418 с.
92. *Волгин Н. С.* Исследование операций: учеб. пособие для слушателей академии. В 2-х ч. / Н. С. Волгин, Н. В. Махров, В. А. Юровский. – Л.: ВМА, 1978-1979. – Часть 1 – 366 с.; Часть 2 – 334 с.
93. *Волгин Н. С.* Математическое моделирование морских боев и операций. Работа командира по организации математического моделирования в органе управления. – Л.: ВМА, 1990. – 240 с.
94. *Воронцова Е. А., Хильдебранд Р. Ф., Гасников А. В., Стонякин Ф. С.* Выпуклая оптимизация: учебное пособие. – М.: МФТИ, 2021. – 364 с.
95. *Воропаева О. Ф.* Численные модели динамики безымпulsive турбулентного следа в устойчиво стратифицированной среде // Вычислительные технологии. – 2004. – Т. 9, № 4. – С. 15-41.
96. Временный Полевой устав РККА 1936 (ПУ 36). – М.: Гос. воен. изд-во НО СССР, 1937. – 216 с.

97. *Галяев А. А.* Оптимизация плана перехвата прямолинейно движущихся целей / Галяев А.А., Яхно В.П., Лысенко П.В., Берлин Л. М., Бузиков М. Э. // Автоматика и телемеханика. – 2023. – № 10. – С. 18-36.
98. *Галяев А. А., Маслов Е. П.* Оптимизация законов уклонения подвижного объекта от обнаружения // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2010. – №4. – С. 43-53.
99. *Галяев А. А., Маслов Е. П.* О патрулировании барьера сетью мобильных сенсоров // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2013. – №2. – С. 167-173.
100. *Галяев А. А., Маслов Е. П.* Уклонение в конфликтной среде от обнаружения системой разнородных наблюдателей // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – №4. – С. 18-27.
101. *Галяев А. А., Маслов Е. П., Яхно В. П., Абрамянц Т. Г.* Уклонение подвижного объекта от обнаружения в конфликтной среде // Управление большими системами. – 2019. – Вып. 79. – С. 112-184.
102. *Галяев А. А., Рябушев Е. А.* Поиск субоптимального решения динамической задачи коммивояжера методом Монте-Карло // Автоматика и телемеханика. – 2024. – С. 103-119.
103. *Галяев А. А., Яхно В. П., Лысенко П. В., Берлин Л. М., Бузиков М. Э.* Оптимизация плана перехвата прямолинейно движущихся целей // Автоматика и телемеханика. – 2023. – № 10. – С. 18-36.
104. *Гамкрелидзе Р. В.* История открытия принципа максимума Понтрягина // Труды МИАН. – 2019. – Т. 304. – С. 7–14.
105. *Гаррет Р., Лондон Д.* Основы анализа операций на море. – М.: Воениздат, 1974. – 270 с.
106. *Герасимов В. В.* Выступление начальника Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации – первого заместителя Министра обороны Российской Федерации генерал-полковника В. В. Герасимова: Основные тенденции развития форм и способов применения вооруженных сил, актуальные задачи военной науки по их совершенствованию // Вестник Академии военных наук. – 2013. – № 1 (42). – С. 24-29.
107. *Гермейер Ю. Б.* Введение в теорию исследования операций. – М.: Гл. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1971. – 384 с.
108. *Гермейер Ю. Б.* Игры с противоположными интересами. – М.: Наука, 1976. – 327 с.
109. *Гирник Е. С., Манилов А. Л., Шумов В. В.* Пограничная статистика и ее применение для оценки уровня пограничной безопасности на внешних границах государств – участников СНГ : монография / под общ. ред. В. В. Шумова. – М.: КЖИ «Граница», 2022. – 232 с.
110. *Гланц Д. М.* Восставшие из пепла : как Красная Армия 1941 года превратилась в Армию Победы / пер. с англ. В. Федорова. – М.: Эксмо, 2009. – 541 с.
111. Глоссарий терминов и понятий, используемых государствами – участниками СНГ в пограничной сфере. – Приложение к постановлению МПА СНГ от 13.04.2018 № 47-13.
112. *Глушков В. М., Амосов Н. М., Артеменко И. А.* Энциклопедия кибернетики. – Том 1. – Киев: Укр. сов. энциклопедия, 1974. – 607 с.

113. *Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д.* Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ. – М.: Наука, 1965. – 525 с.
114. *Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н.* Введение в теорию массового обслуживания. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
115. *Голубчик М. М.* Политическая география мира: Учебное пособие. – Смоленск: Изд-во СГУ, 1998. – 320 с.
116. *Горевич Б. Н.* Методический подход к оценке эффективности обороны объектов (на примере ПВО) // Военная мысль. – 2007. – № 6. – С. 39-48.
117. *Горелик В. А., Горелов М. А., Кононенко А. Ф.* Анализ конфликтных ситуаций в системах управления. – М.: Радио и связь, 1991. – 288 с.
118. *Гребенищikov Я. А.* Военная организация и статистика. – СПб.: тип. В. Безобразова и К<sup>о</sup>, 1879. – 17 с.
119. *Григоренко Н. Л.* Математические методы управления несколькими динамическими процессами: учебное пособие для вузов. – М: Издательство МГУ, 1990. – 197 с.
120. *Григорьев И. С.* Оптимизация экспедиции к Фобосу с комбинированной тягой с возвращением к Земле / Григорьев И. С., Заплетин М.П., Самохин А. С., Самохина М. А. // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2017. – №7(67). – С. 1-24.
121. *Грушин Б. А.* Эффективность массовой информации и пропаганды: понятие и проблемы измерения. – М.: Знание, 1979. – 64 с.
122. *Губанов Д. А., Новиков Д. А., Чхартушвили А. Г.* Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства / Под ред. Д. А. Новикова. – М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 2010. – 228 с.
123. *Губко М. В.* Задачи управления организационными системами с сетевым взаимодействием участников // Автоматика и телемеханика. – 2004. – № 8. – С. 102-129.
124. *Губко М. В., Новиков Д. А.* Теория игр в управлении организационными системами. – 2-е изд. – М., 2005. – 138 с.
125. *Гуляков А. Д.* Экспертная оценка зарубежных моделей федерализма (сравнительный историко- государственоведческий анализ) // Вестник Томского государственного университета. Право. – 2020. – № 35. – С. 43-55.
126. *Гусев В. В.* Векторы Шепли, Оуэна и Ауманна–Дрезе в игре патрулирования с коалиционной структурой // Математическая теория игр и ее приложения. – 2016. – Т. 8, вып. 4. – С. 30–42.
127. *Гусев В. В., Мазалов В. В.* Оптимальные стратегии в игре патрулирования на графе // Вестник СПбГУ. Сер. 10. – 2015. – Вып. 2. – С. 61-76.
128. *Давыденко В. П., Лоскутов Н. Г., Иванов Л. А.* Основы военной кибернетики: учебник. – Л.: Воен. акад. связи, 1970. – 403 с.
129. *Далио Р.* Принципы изменения мирового порядка. Почему одни нации побеждают, а другие терпят поражение. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2023. – 528 с.
130. *Дегтерев Д. А.* Зарубежные работы по теории игр // Международные процессы. – 2009. – № 2 (20). – С. 58-72.
131. *Дегтерев Д. А., Дегтерев А. Х.* Теория игр и международные отношения // Мировая экономика и международные отношения. – 2011. – № 2. – С. 79-89.

132. Диев В. С. Управление. Философия. Общество // Вопросы философии. – 2010. – № 8. – С. 35 – 41.
133. Добровидов А. В., Кулида Е. Л., Рудько И. М. Выбор траектории движения объекта в конфликтной среде // Проблемы управления. – 2011. – №2. – С. 64–75.
134. Доронин Ю. П. Физика океана: учебник. СПб.: РГГМУ, 2000. – 339 с.
135. Дранко О. И., Новиков Д. А., Райков А. Н., Чернов И. В. Управление развитием региона. Моделирование возможностей. – М.: URSS, ЛЕНАНД, 2023. – 432 с.
136. Дрешер М. Стратегические игры. Теория и приложения. – М.: Советское радио, 1964. – 353 с.
137. Дульнев П. А., Костокрызов А. И. О методическом подходе к оценке интегрального показателя эффективности управления формированиями Сухопутных войск в условиях имитационного моделирования общевойскового боя // Вестник Академии военных наук. – 2019. – № 1(66). – С. 35-42.
138. Дуров В. Р. Боевое применение и боевая эффективность истребителей-перехватчиков. – М.: Воениздат, 1972. – 280 с.
139. Дюбин Г. Н., Суздаль В. Г. Введение в прикладную теорию игр. – М.: Наука, 1981. – 336 с.
140. Евин И. А. Введение в теорию сложных сетей // Компьютерные исследования и моделирование. – 2010. – Т. 2, № 2. – С. 121-141.
141. Егоров А. И. Обыкновенные дифференциальные уравнения с приложениями. – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 384 с.
142. Егорова Л. Г., Климюк И. Ю. Применение процессов Хоукса для прогнозирования финансовых рисков: препринт WP7/2017/02. – М.: ВШЭ, 2017. – 36 с.
143. Ещенко Я. В., Новиков А. В. Способы противодействия морскому пиратству // Морской сборник. – 2014. - № 1 (2002). – С. 55-58.
144. Жукова М. Г. Твой есмь Аз. Суворов. – 6-е изд., испр. – М.: Изд-во Сретенского монастыря, 2010. – 160 с.
145. Захаров А. В. Теория игр в общественных науках: учебник для вузов. – М.: Изд. дом ВШЭ, 2015. – 304 с.
146. Зеленов А. В. Десантно-штурмовые действия в современном военном конфликте и перспектива их развития // Военная мысль. – 2021. – № 6. – С. 28-33.
147. Зубец А. Н. Истоки и история экономического роста. – М.: Экономика, 2014. – 463 с.
148. Иванов Д. Я. Методы роевого интеллекта для управления группами малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 3(116). – С. 221-229.
149. Иванов Р. П. Простое преследование – убегание на компакте // ДАН СССР. – 1980. – Т. 254, № 6. – С. 1318-1321.
150. Ильин В. В. Философия и история науки. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.
151. Индекс человеческого развития в России: региональные различия. Аналитическая записка. – М.: Аналитический центр при Правительстве РФ, 2021. – 22 с.
152. Ионин Г. Теория общевойскового боя требует переосмысления, развития и совершенствования // Военно-промышленный курьер. – 2005. – № 21 (88). – С. 4.

153. *Исаев А. В.* Неизвестный 1941: остановленный блицкриг. – М.: Эксмо, 2010. – 478 с.
154. Искусственные нейронные сети: практикум / В. В. Цехановский, Е. Ю. Бутырский, Н. А. Жукова и др. – М.: Издательство "КноРус", 2024. – 382 с.
155. Искусственные нейронные сети: учебник / под ред. В. В. Цехановского. – М.: КНОРУС, 2022. – 352 с.
156. *Иссерсон Г. С.* Новые формы борьбы: Опыт исследования современных войн. – М.: Военгиз, 1940. – 75 с.
157. История русской армии от зарождения Руси до войны 1812 г. – СПб.: Изд-во Полигон, 2003. – 702 с.
158. *Каляев А. И., Каляев И. А.* Самоорганизующиеся распределенные системы. – М.: РАН, 2023. – 156 с.
159. *Каляев И. А.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов : монография / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. – М.: Физматлит, 2009. – 278 с.
160. *Каляев И. А., Капустян С. Г., Гайдук А. Р.* Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели // Управление большими системами. – 2010. – Вып. 30. – С. 605-639.
161. *Каменецкий Е. С., Басаева Е. К.* Об одном методе предсказания нерегулярной смены власти // Вопросы безопасности. – 2019. – № 6. – С. 38–47.
162. *Капустин В. Ф.* Неопределенность: виды, интерпретации, учет при моделировании и принятии решений // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 1993. – Сер. 5. Вып.2 (12). – С. 108-113.
163. *Караганов С. А.* Уход военного превосходства запада и геэкономика // Полис. Политические исследования. – 2019. – № 6. – 8-21.
164. *Касатонов В. Ю.* Вашингтонский консенсус: десять заповедей для «экономических убийц» // Русское экономическое общество им. С. Ф. Шарпова. 2019. – URL: <https://reosh.ru/valentin-katasonov-vashingtonskij-konsensus-desyat-zapovedej-dlya-ekonomicheskix-ubijc.html> (дата обращения: 20.06.24).
165. *Катулев А. Н., Северцев Н. А., Соломаха Г. М.* Исследование операций и обеспечение безопасности: прикладные задачи: учеб. пособие для вузов / Под ред. академика РАН П. С. Краснощекова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 240 с.
166. *Квачков В. В.* Спецназ России. – М.: Русская панорама, 2007. – 207 с.
167. *Клаузевиц К.* О войне: Пер. с нем. – М.: Логос, Наука, 1994. – 448 с.
168. *Ковалев А. А.* Аксиома марксизма. 01.11.2019. – URL: <https://kprf.ru/ruso/189112.html> (дата обращения: 20.06.24).
169. *Колмогоров А. Н.* Об аналитических методах в теории вероятностей // УМН. – 1938. – Вып. 5. – С. 5-41.
170. *Колмогоров А. Н.* Число попаданий при нескольких выстрелах и общие принципы оценки эффективности системы стрельбы // Тр. Матем. ин-та им. В. А. Стеклова. – 1945. – Т. 12. – С. 7–25.
171. *Колмогоров А. Н.* Искусственное рассеивание в случае поражения одним попаданием и рассеивания в одном измерении // Тр. Матем. ин-та им. В. А. Стеклова. – 1945. – Т. 12. – С. 26–45.
172. *Колобашкина Л. В.* Основы теории игр: учебное пособие. 5-е изд., электрон. – М.: Лаборатория знаний, 2021. – 198 с.

173. Контртеррористическая операция на Северном Кавказе: основные уроки и выводы (3) // Военная мысль. – 2000. – № 4. – С. 2-17.
174. Концепция противодействия терроризму в Российской Федерации. – Утв. Президентом РФ 5 октября 2009 г.
175. *Кореванов С. В., Казин В. В.* Искусственные нейронные сети в задачах навигации беспилотных летательных аппаратов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2014. – № 201. – С. 46-49.
176. *Корепанов В. О., Новиков Д. А.* Задача о диффузной бомбе // Проблемы управления. – 2011. – №5. – С. 66–73.
177. *Корепанов В. О., Новиков Д. А.* Рефлексивная игра полковника Блотто // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – №1(47). – С. 55–62.
178. *Корепанов В. О., Новиков Д. А.* Модели стратегического поведения в задаче о диффузной бомбе // Проблемы управления. – 2015. – № 2. – С. 38 – 44.
179. *Корепанов В. О., Чхартишвили А. Г., Шумов В. В.* Теоретико-игровые и рефлексивные модели боевых действий // Компьютерные исследования и моделирование. – 2022. – Т. 14. – № 1. – С. 179–203.
180. *Корепанов В. О., Чхартишвили А. Г., Шумов В. В.* Базовые модели боевых действий // Управление большими системами. – 2023. – Вып. 103. – С. 40-77.
181. *Корепанов В. О., Шумов В. В.* Распределение пограничных ресурсов с использованием равновесия Штакельберга // Электронное научное издание альманах «Пространство и время». – 2013. – Т. 3, № 1. – 12 с.
182. *Корепанов В. О., Шумов В. В.* Моделирование военных, боевых и специальных действий // Военная мысль. – 2023. – № 1. – С. 28–41.
183. *Кортни Х., Керкленд Дж., Вигери П.* Стратегия в условиях неопределенности // Экономические стратегии. – 2002. – №6. – С. 78-85.
184. *Карякин Н. А.* Прожекторы (теория и расчет): учебное пособие. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1944. – 455 с.
185. *Крапивин В. Ф.* О теории живучести сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 248 с.
186. *Красников А. К., Новиков Е. С.* Принципы построения информационной системы исследований динамики и эффективности противоборства корабельных систем // Морское оборудование и технологии. – 2021. – № 4 (29). – С. 81-89.
187. *Краснов Б. И.* Анализ политической ситуации. Метод сценариев // Социально-полит. журнал. – 1997. – № 5. – С. 91-93.
188. *Краснощеков П. С., Петров А. А.* Принципы построения моделей. – М.: Изд-во МГУ, 1983. – 264 с.
189. *Красовский Н. Н., Субботин А. И.* Позиционные дифференциальные игры. – М.: Наука, 1974. – 456 с.
190. *Кремнев П. П.* Формы и правовые последствия начала и окончания вооруженных конфликтов // Право. Журнал Высшей школы экономики. – 2021. – № 5. – С. 215–235.
191. *Крылов А. А.* Психология: Учебник. 2-е изд. – М.: Проспект, 2005. – 744 с.
192. *Кудров М. А., Бухаров К. Д., Захаров Э. А., Махоткин Д. Р., Кривошеин Н. Е., Гришин Н. А., Семенкин В.* Интеллектуальный алгоритм управления группой беспилотных аппаратов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2019. – № 4. – С. 3-11.
193. *Кузин Л. Т.* Основы кибернетики. – М.: Энергия, 1979. Т 1. – 504 с. Т. 2. – 584 с.

194. *Кузнецов А. П., Кузнецов С. П., Седова Ю. В.* «Нелинейный минимум» в теории дискретных отображений // Изв. вузов «ПНД». – 2006. – Т. 14, № 4. – С. 89-118.
195. *Кузнецов Д. В.* Проблемы Ближнего Востока и общественное мнение: в 2-х частях. Часть II: Иракский кризис. – Благовещенск: Изд-во БГПУ, 2009. – 440 с.
196. *Кузьмин Р. Н., Филяев М. П.* Имитационное моделирование систем военного назначения, действий войск и процессов их обеспечения // Труды Второй всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в военной сфере. 2022. – 129 с.
197. *Кукушкин Н. С., Морозов В. В.* Теория неантагонистических игр. – М.: МГУ, 1984. – 104 с.
198. *Куливец С. Г.* Моделирование конфликтных ситуаций с несогласованными представлениями у агентов на основе игр на линейных когнитивных картах // Проблемы управления. – 2010. – №4. – С. 42–48.
199. *Кун Т.* Структура научных революций / Пер. с англ. И.З. Налетова. – М.: АСТ, 2009. – 317 с.
200. *Кучков А. Ф., Лукашевич Н. Ф., Попов Г. П., Шумов В. В.* Математическое моделирование служебно-боевых действий пограничных войск: Учебник. В 3-х томах. – М.: Академия ФПС России, 1997. – Т.1. – 195 с.; Т.2. – 191 с.; Т.3. – 240 с.
201. *Левитин А. В.* Алгоритмы: введение в разработку и анализ / пер. с англ. – М.: ИД «Вильямс», 2006. – 576 с.
202. *Ленин В. И.* «Сожаление» и «стыд» // Полное собрание сочинений. 5-е изд. Т. 20. – М.: Политиздат, 1973. – С. 245–250.
203. *Лефевр В. А.* Элементы логики рефлексивных игр // Проблемы инженерной психологии. – 1966. – Вып. 4. – С. 273 – 299.
204. *Лефевр В. А.* Конфликтующие структуры. – М.: Сов. радио, 1973. – 159 с.
205. *Ливи Баччи М.* Демографическая история Европы. Пер. с итал. А. Миролубовой. – СПб.: Александрия, 2010. – 310 с.
206. *Лифшиц А. Л.* Кибернетика в Военно-Морском Флоте. – М.: Воениздат, 1964. – 258 с.
207. *Люттвак Э. Н.* Стратегия Византийской империи / Пер. с англ. А. Н. Коваля. – М.: Университет Дмитрия Пожарского, 2010. – 664 с.
208. *Маевский А. М.* Разработка многоуровневой системы планирования траектории движения группы АНПА в неизвестной среде с препятствиями / Маевский А.М., Морозов Р.О., Рыжов В. А., Горелый А. Е. // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 1(218). – С. 30-47.
209. *Мазалов В. В.* Математическая теория игр и приложения. – СПб.: Лань, 2010. – 448 с.
210. *Макаренко С. И.* Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетцентрических войнах начала XXI века: монография. – СПб.: Научное издание, 2017. – 546 с.
211. *Макаренко С. И., Афонин И. Е., Копичев О. А., Мамончикова А. С.* Обобщенная модель Ланчестера, формализующая конфликт нескольких сторон // Automation of Control Processes. – 2021. – № 2 (64). – С. 66-76.
212. *Макаренко С. И., Иванов М. С.* Сетцентрическая война – принципы, технологии, примеры и перспективы: Монография. – СПб.: Научное издание, 2018. – 898 с.

213. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Ильин Н. И., Сушко Е. Д. Национальная безопасность России // Экономические стратегии. – 2020. – № 5. – С. 6-23.
214. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Логинов Е. Л. Применение экономико-математических методов и моделей оптимального планирования в цифровой экономике будущего (ЦЭМИ АН СССР и ЦЭМИ РАН: прогностическая интерпретация и развитие научного наследия нобелевских лауреатов Л. В. Канторовича и В. В. Леонтьева). – М.: ЦЭМИ РАН, 2022. – 248 с.
215. Макачук И. Л., Троценко К. А. Характер операций современных армий. Мультиразумные сетевые военные системы и тактика их действий // Военная Мысль. – 2022. – № 11. – С. 13-31.
216. Малишевский А. В. Качественные модели в теории сложных систем. – М.: Физматлит, 1998. – 528 с.
217. Манилов А. Л. Моделирование деятельности пограничных ведомств государств – участников Содружества Независимых Государств: учебное пособие / А. Л. Манилов, В. Н. Савенко, В. В. Шумов, под ред. В. А. Дмитриева. – М.: Граница, 2014. – 608 с.
218. Манойло А. В. Государственная информационная политика в особых условиях: Монография. – М.: МИФИ, 2003. – 388 с.
219. Маракулин В. М. Теория пространственного равновесия: существование иммиграционно состоятельного деления на страны в многомерном случае // Сиб. журн. чист. и прикл. матем. – 2017. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 64-78.
220. Маракулин В. М. О существовании пространственного равновесия и обобщенных теоремах о неподвижной точке // Журнал Новой экономической ассоциации. – 2019. – № 2 (42). – С. 12-34.
221. Марков А. А. Распространение закона больших чисел на величины, зависящие друг от друга. – Казань: типо-лит. Имп. ун-та, 1907. – 22 с.
222. Маряшин Ю., Малащук Л., Писарев А., Филатов В. Функциональная надежность летного состава // Армейский сборник. – 2018. – № 3. – С. 56-63.
223. Маслоу А. Мотивация и личность. – СПб.: Издательство Питер, 2006. – 352 с.
224. Математическая теория планирования эксперимента / Под ред. С. М. Ермакова. – М.: Наука, 1983. – 392 с.
225. Медин А. Имитационная система JTLS // Зарубежное военное обозрение. – 2010. – № 2. – С. 31-34; № 3. – С. 26-31; № 4. – С. 35-37.
226. Международное право: учебник / Отв. ред. Ф. И. Кожевников. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Международные отношения, 1987. – 590 с.
227. Международное право: учебник / Под ред. А. И. Микульшина. – М.: Международные отношения, 2005. – 360 с.
228. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
229. Методические рекомендации капитану торгового судна при осуществлении плавания в пиратоопасном районе. – М.: ВМФ России, 2010. – 16 с.
230. Методы оптимизации: учебник и практикум для вузов / Под редакцией Ф. П. Васильева. – М.: Издательство Юрайт, 2023. – 375 с.
231. Милютин Д. А. Первые опыты военной статистики. – В 2-х т. – СПб.: Тип. Воен.-учеб. заведений, 1847-1848.
232. Мирзоян Р. А. Управление как предмет философского анализа // Вопросы философии. – 2010. – № 4. – С. 35 – 47.
233. Мировая война в цифрах. – М., Л.: Гос. воен. издат., 1934. – 128 с.

234. *Митюков Н. В.* М. П. Осипов: к идентификации личности автора первой модели глобальных процессов // Историческая психология и социология истории. – 2011. – Т. 4. – № 2. – С. 203-207.
235. *Михайлов А. А.* «Изучение всех военных сил и средств государства в данный момент». Военная география и военная статистика в отечественной науке: историографические аспекты // Военно-исторический журнал. – 2018. – № 3. – С. 40-51.
236. *Михневич Н.* Суворов – стратег // Не числом, а умением! Военная система А.В. Суворова. Российский военный сборник. – Вып. 18. – М.: Военный университет, 2001. – С. 342-349.
237. *Моисеев В. С.* Основы теории эффективного применения беспилотных летательных аппаратов: монография. – Казань: РИЦ «Школа», 2015. – 444 с.
238. *Моисеев Н. Н.* Экология человечества глазами математика: (Человек, природа и будущее цивилизации). – М.: Мол. гвардия, 1988. – 254 с.
239. *Морз Ф. М., Кимбелл Дж. Е.* Методы исследования операций / пер. с англ., под ред. А. Ф. Горохова. – М.: Советское радио, 1956. – 307 с.
240. *Морозов В. В., Шалбузов К. Д.* Игровая модель распределения ресурсов при защите объекта // Математическая теория игр и ее приложения. – 2013. – Т. 5, вып. 4. – С. 66-83.
241. *Мулен Э.* Кооперативное принятие решений: аксиомы и модели. – М.: Мир, 1991. – 464 с.
242. *Натансон И. П.* Краткий курс высшей математики: учебное пособие. 10-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 736 с.
243. *Нейман Дж. фон, Моргенштерн О.* Теория игр и экономическое поведение. – М.: RUGRAM, 2013. – 708 с.
244. *Нефедов С. А.* Факторный анализ исторического процесса. История Востока. – М.: «Территория будущего», 2008. – 752 с.
245. *Никитин В. А.* Организационные типы современной культуры: автореферат дис. ... доктора культурологии: 24.00.01 / Рос. ин-т культурологии. – М., 1998. – 49 с.
246. Новая философская энциклопедия (2000–2001): в 4 т. / Гл. ред. В. С. Стёпин. – М.: Мысль. Т. 1: А - Д. – 2010. – 741 с.; Т. 2: Е - М. – 2010. – 634 с.; Т. 3: Н - С. – 2010. – 692 с.; Т. 4: Т - Я. – 2010. – 734 с.
247. *Новиков А. М., Новиков Д. А.* Методология. – М.: СИНТЕГ, 2007. – 668 с.
248. *Новиков А. М., Новиков Д. А.* Методология научного исследования. – М.: Либроком, 2010. – 280 с.
249. *Новиков Д. А.* Распределение Парето в задачах стимулирования // Управление инновациями. Материалы международной научно-практической конференции. – 2006. – С. 299-303.
250. *Новиков Д. А.* «Когнитивные игры»: линейная импульсная модель // Проблемы управления. – 2008. – № 3. – С. 14-22.
251. *Новиков Д. А.* Игры и сети // Математическая теория игр и ее приложения. – 2010. – Том 2. – Вып. 1. – С. 107–124.
252. *Новиков Д. А.* Методология управления. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. – 128 с.
253. *Новиков Д. А.* Иерархические модели военных действий // Управление большими системами. – 2012. – Вып. 37. – С. 25-62.

254. *Новиков Д. А.* Модели стратегической рефлексии // Автоматика и телемеханика. – 2012. – № 1. – С. 3-18.
255. *Новиков Д. А.* Кибернетика: Навигатор. История кибернетики, современное состояние, перспективы развития. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 160 с.
256. *Новиков Д. А.* Управление, деятельность, личность. – М.: ИПУ РАН, 2020. – 80 с.
257. *Новиков Д. А.* Теория управления организационными системами. 4-е изд., испр. и доп. – М.: ЛЕНАНД, 2022. – 500 с.
258. *Новиков Д. А.* Ограниченная рациональность и управление // Математическая теория игр и ее приложения. – 2022. – Том 14. – Вып. 1. – С. 49-84.
259. *Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г.* Рефлексивные игры. – М.: СИНТЕГ, 2003. – 149 с.
260. *Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г.* Рефлексия и управление: математические модели. – М.: URSS, 2022. – 416 с.
261. О безопасности. Федеральный закон от 28.12.2010 N 390-ФЗ (ред. от 10.07.2023).
262. О государственной границе. Модельный закон. Приложение к Постановлению МПА СНГ от 28.10.2010 г. № 35-9 с изменениями (приложение к постановлению МПА СНГ от 28.10.2022 г. № 54-7).
263. О Государственной границе Российской Федерации. Закон Российской Федерации от 1.04.1993 г. № 4730-1.
264. О пограничной безопасности. Модельный закон. Приложение к Постановлению МПА СНГ от 28.10.2010 г. № 35-10 с изменениями (приложение к постановлению МПА СНГ от 28.10.2022 г. № 54-6).
265. О противодействии терроризму. Федеральный закон от 06.03.2006 N 35-ФЗ (ред. от 10.07.2023).
266. О стратегическом планировании в Российской Федерации. Федеральный закон от 28.06.2014 N 172-ФЗ (ред. от 17.02.2023).
267. Обзорный доклад о модернизации в мире и Китае (2001–2010) / Пер. с англ. под общ. ред. Н. И. Лапина. – М.: Весь Мир, 2011. – 256 с.
268. Общая тактика : учебник / Ю. Б. Байрамуков и др.; под общ. ред. Ю. Б. Торгованова. – 2-е изд., испр. и доп. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. – 346 с.
269. *Овчаров Л. А.* Прикладные задачи теории массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1969. – 324 с.
270. *Опойцев В. И.* Равновесие и устойчивость в моделях коллективного поведения. – М.: Наука. 1977. – 248 с.
271. *Оркин Б. Д.* Имитационное моделирование воздушного боя истребителей: учебное пособие для вузов / Б. Д. Оркин, С. Д. Оркин, И. А. Прохоров. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 339 с.
272. *Орлов А. И.* Организационно-экономическое моделирование: учебник. В 3 ч. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – Ч. 2. Экспертные оценки. – 2011. – 486 с.
273. *Орловский С. А.* Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Наука. 1981. – 208 с.
274. *Осипов М. П.* Влияние численности сражающихся сторон на их потери // Военный сборник. – 1915. – №6. – С. 59–74; №7. – С. 25–36; №8. – С. 31–40; №9. – С. 25–37.

275. Основы государственной пограничной политики Российской Федерации. – Утверждены указом Президента Российской Федерации от 25 апреля 2018 года N 174.
276. *Островских Ж. В.* Бандитизм: криминологическая и уголовно-правовая характеристика: учебное пособие. – Иркутск, БГУЭП, 2007. – 153 с.
277. *Охоцимский Д. Е.* К теории движения ракет // Прикладная математика и механика. – 1946. – Т. 10, № 2. – С. 251-272.
278. Очерки истории информатики в России / Ред.-сост. Д. А. Поспелов, Я. И. Фет. – Новосибирск: Науч.-изд. центр ОИГГМ СО РАН, 1998. – 662 с.
279. *Павлов С. Н.* Системы искусственного интеллекта : учеб. пособие. В 2-х частях. – Томск: Эль Контент, 2011. – Ч. 1. – 176 с.
280. *Павловский Ю. Н.* О факторе Л. Н. Толстого в вооруженной борьбе // Математическое моделирование. – 1993. – Т. 5. – № 1. – С. 3-15.
281. *Паньковский Ю. И., Бобин А. В., Слатин А. В.* Технология построения имитационной математической модели воспроизведения хода боевых действий // Труды конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». – Т. 1. – СПб.: СПИИРАН, 2011. – С. 229–233.
282. *Пенской В. В.* Военная революция XVI-XVII вв. и ее изучение в зарубежной и российской историографии второй половины XX – начала XXI вв. // Научные ведомости. – 2008. – № 5 (45). – С. 67-73.
283. *Петров А. Н., Саяпин О. В., Денисов В. Н.* Система моделирования военных (боевых) действий Вооруженных Сил Российской Федерации // Военная мысль. – 2019. – № 8. – С. 27-32.
284. *Петров М. Н.* Как уничтожать террористов: действия штурмовых групп: (практическое пособие). – Минск: Харвест, 2016. – 319 с.
285. *Петровский А. В.* Теория принятия решений. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 400 с.
286. *Петросян Л. А.* Дифференциальные игры преследования. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. – 244 с.
287. *Петросян Л. А., Гарнаев А. Ю.* Игры поиска. – СПб.: Изд-во С-Пб. ун-та, 1992, - 216 с.
288. *Петросян Л. А., Зенкевич Н. А., Семина Е. А.* Теория игр. – М.: Высшая школа, 1998. – 304 с.
289. *Петросян Л. А., Зенкевич Н. А., Шевкопляс Е. В.* Теория игр: учебник/ - 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.
290. *Петросян Л. А., Томский Г. В.* Геометрия простого преследования. – Новосибирск, Наука, 1983. - 143 с.
291. *Пиетров-Эннкер Б., Ульянова Г.* Модернизация, гражданское общество и гражданская идентичность: о концепции книги // Гражданская идентичность и сфера гражданской деятельности в Российской империи / Под ред. Б. Пиетров-Эннкер, Г.Ульяновой. – М.: РОССПЭН, 2007. – С.7-34.
292. *Плиева А. С.* Взаимодействие власти и прокуратуры в вопросах федеральной безопасности: понятийно-терминологический аспект // Theories and Problems of Political Studies. – 2014. – № 6. – С. 28–44.
293. *Плужников А. А.* Развитие системы моделирования боевых действий Сухопутных войск // Военная мысль. – 2020. – № 10. – С. 37–44.
294. Пограничная безопасность: монография / под общ. ред. В. В. Шумова и с предисловием Н. И. Турко. – М.: КЖИ «Граница», 2024. – 540 с.

295. *Подиновский В. В., Ногин В. Д.* Парето-оптимальные решения многокритериальных задач: монография. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Физматлит, 2007. – 255 с.
296. *Поздынин В. Д.* Мелкомасштабная турбулентность в океане. – М.: Наука, 2002. – 201 с.
297. *Поленин В. И.* Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства. – СПб: СПб-региональное отделение РАЕН, 2011. – 416 с.
298. *Поляк Г. Л.* Математическая модель экономических последствий вооруженного противостояния неравных по силе противников // Экономические науки. – 2011. – № 85. – С. 381-386.
299. *Поляков В. Н.* Компьютерные модели и методы в типологии и компаративистике: Монография / В. Н. Поляков, В. Д. Соловьев. – Казань: КГУ, 2006. – 208 с.
300. *Понтрягин Л. С.* К теории дифференциальных игр // Успехи математических наук. – 1966. – Т. 21, вып. 4. – С. 219-274.
301. *Понтрягин Л. С.* Линейные дифференциальные игры преследования // Матем. сб. – 1980. – Том 154, № 3. – С. 307-330.
302. *Понтрягин Л. С.* Математическая теория оптимальных процессов и дифференциальные игры // Тр. МИАН СССР. – 1985. – № 169. – С. 119–158.
303. *Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф.* Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 1961. – 392 с.
304. *Потапов А. А.* Тактика антитеррора. – М.: ФАИР, 2008. – 480 с.
305. Правила стрельбы и управления огнем артиллерии (ПСиУО-96). Ч. 1. Дивизион, батарея, взвод, орудие. – М.: Воениздат, 2001. – 264 с.
306. Применение теории игр в военном деле / Сборник переводов. – М.: Советское радио, 1961. – 360 с.
307. Психология: Учебник для гуманитарных вузов / Под ред. В. Н. Дружинина. – СПб., М., Харьков, Минск: Изд-во Питер, 2001. – 656 с.
308. *Пшеничный Б. Н.* Простое преследование несколькими объектами // Кибернетика. – 1976. – № 3. – С. 145-146.
309. Речь Г. К. Жукова на военно-научной конференции, декабрь 1945 г. // Военная мысль. – 1985. Специальный выпуск (февраль). – С. 3, 17–33.
310. *Романовский И. В.* Алгоритмы решения экстремальных задач. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 1977. – 352 с.
311. *Ромашев Ю. С.* Борьба с пиратством и вооруженным разбоем на море (правовые основы и практика): монография. – М.: Транс Лит, 2013. – 332 с.
312. Российская социологическая энциклопедия / Под общ. ред. Г. В. Осипова. – М.: НОРМА–ИНФРА М, 1998. – 672 с.
313. Русский архив. Великая Отечественная. Т. 12 (1-2). Накануне войны: Материалы совещания высшего руководящего состава РККА 23-31 декабря 1940 г. – М.: ТЕРРА, 1993. – 408 с.
314. *Рябинин И. А.* Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: СПбГУ, 2007. – 275 с.
315. *Саати Т. Л.* Математические методы исследования операций. – М.: Воениздат, 1963. – 420 с.

316. *Савин Л. В.* Сетецентричная и сетевая война. Введение в концепцию. – М.: Евразийское движение, 2011. – 130 с.
317. *Саяпин В. О.* О сценарном подходе к прогнозированию // Вестник Тамбовского университета. Серия: гуманитарные науки. – 2010. – № 10 (90). – С. 164-168.
318. Сборник статей по теории стрельбы / Под ред. акад. А. Н. Колмогорова. – Л., М.: Изд-во АН СССР. – 1945. – Т. 12. – 106 с.
319. *Симаков А.* Организация и вооружение перспективных дивизий сухопутных войск США // Зарубежное военное обозрение. – 2023. – № 6. – С. 35-44.
320. *Скачко П. Г., Волков Г. Т., Куликов В. М.* Планирование боевых действий и управление войсками с помощью сетевых графиков. – М.: Воениздат, 1968. – 145 с.
321. *Снесарев А. Е.* Введение в военную географию. – М.: Типо-лит. Воен. акад. РККА, 1924. – 414 с.
322. Социология: Энциклопедия / Сост. А. А. Грицанов, В. Л. Абушенко, Г. М. Евелькин, Г. Н. Соколова, О. В. Терещенко. – Мн.: Книжный Дом, 2003. – 1312 с.
323. Справочник офицера воздушно-космической обороны / под общ. ред. С. К. Бурмистрова. – Тверь: ВА ВКО, 2006. – 564 с.
324. Справочник офицера противовоздушной обороны / Под ред. Г. В. Зимина. – М.: Воениздат, 1981. – 431 с.
325. *Стёпин В. С.* Философия науки. Общие проблемы: учебник для аспирантов и соискателей ученой степени кандидата наук. – М.: Гардарики, 2006. – 384 с.
326. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации. – Утверждена указом Президента Российской Федерации от 31.12.2015 № 683.
327. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации. – Утверждена указом Президента Российской Федерации от 02.07.2021 № 400.
328. *Строгалев В. П., Толкачева И. О.* Имитационное моделирование. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 295 с.
329. *Сунь Цзы.* Искусство войны / пер. с кит., предисловие и коммент. Н.И. Конрада. – М.: АСТ, Астрель, 2011. – 606 с.
330. *Сушков Ю. Н.* Кибернетика в бою («Научно-популярная библиотека»). – М.: Воениздат, 1972. – 152 с.
331. Тактика в боевых примерах: дивизия / под общ. ред. А. И. Радзиевского. – М.: Воениздат, 1976. – 295 с.
332. *Тараканов К. В.* Математика и вооруженная борьба. – М.: Воениздат, 1974. – 250 с.
333. *Тарасевич Ю. Ю.* Перколяция: теория, приложения, алгоритмы: учеб. пособие. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 112 с.
334. *Тельнова Н. А.* Основные принципы синергетики и их методологическое значение // Вестник ВолГУ. Серия 7: Философия. Социология и социальные технологии. – 2006. – №5. – С. 14–20.
335. Теория оперативно-розыскной деятельности: учебник / под ред. К. К. Горяинова. – М.: ИНФРА-М, 2009. – 831 с.
336. Теория управления (дополнительные главы): Учебное пособие / Под ред. Д. А. Новикова. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 552 с.
337. Теория управления: словарь системы основных понятий / под общ. ред. Д. А. Новикова. – М.: ЛЕНАНД, 2024. – 128 с.

338. *Типпельскирх К., Кессельринг А. и др.* Итоги Второй мировой войны. Выводы побежденных. Пер. с нем. – СПб.: Полигон; М.: АСТ, 1998. – 640 с.
339. *Ткаченко П. Н.* и др. Математические модели боевых действий. – М.: Советское радио, 1969. – 240 с.
340. *Ткаченко С. Н.* Повстанческая армия: тактика борьбы. – Мн.: Харвест, 2000. – 148 с.
341. *Третьяков В. Т.* Как стать знаменитым журналистом: Курс лекций по теории и практике современной русской журналистики / Предисл. С. А. Мар-кова. – М.: Ладомир, 2004. – 623 с.
342. *Триандафиллов В. К.* Характер операций современных армий. 3-е изд. – М.: Гос. воен. изд-во Наркомата обороны СССР, 1936. – 259 с.
343. Тридцать шесть стратагем. Китайские секреты успеха / Перевод с кит. В.В. Малявина. – М. Белые альвы, 2000. – 192 с.
344. *Тухачевский М. Н.* Избранные произведения в 2-х т. – М.: Воениздат, 1964. – Т.1 (1919-1927 гг.). – 240 с., Т. 2 (1928-1937 гг.). – 264 с.
345. *Тычинский А. В.* Неопределенность в принятии управленческих решений // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2005. – № 52 (8). – С. 118-122.
346. *Тютюнников Н. Н.* Военная мысль в терминах и определениях: в 3 т. – Т. 3. Информатизация Вооруженных Сил. – М.: Перо, 2018. – 472 с.
347. *Тюхтина А. А.* Методы дискретной оптимизации. Часть 2: Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2015. – 72 с.
348. *Уланов А. С.* Логика прикрытия объекта // Армейский сборник. – 2023. – № 6. – С. 46-58.
349. *Урланис Б. Ц.* Войны и народонаселение Европы. – М.: Издательство социально-экономической литературы, 1960. – 565 с.
350. *Урюпин В. Н., Таненя О. С.* Десантно-штурмовые действия на вертолетах как основной способ выполнения боевых задач тактическими воздушными десантами // Военная мысль. – 2021. – № 7. – С. 25-34.
351. Устав Организации Объединенных Наций. Принят в г. Сан-Франциско 26.06.1945. Правила с изм. и доп. от 31.12.1978.
352. *Ушаков И. А.* Надежность: прошлое, настоящее, будущее // Reliability: Theory & Applications. – 2006. – No. 1. – P. 17-27.
353. *Феофанов К. А.* Сценарные возможности современного прогнозирования и управления // Вестник МГТУ «Станкин». – 2009. – №4 (8). – С. 126-132.
354. *Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б., Тихонов В. Ю.* Оптимизация распределения ресурсов в задачах пространственного поиска объектов // Информационные технологии. – 2017. – Т. 23, № 10. – С. 707-713.
355. Философский энциклопедический словарь / Гл. ред. Л. Ф. Ильичев и др. – М.: Сов. Энциклопедия, 1983. – 839 с.
356. *Хеллман О.* Введение в теорию оптимального поиска / Под ред. Н. Н. Моисеева. – М.: Наука, 1985. – 248 с.
357. *Цаллер Дж.* Происхождение и природа общественного мнения. – М.: Изд-во Фонда «Общественное мнение», 2004. – 559 с.
358. *Цезарь Г. Ю.* Записки о галльской войне. – М.: РИПОЛ Классик, 2016. – 413 с.
359. *Цыгичко В. Н.* Модели в системе принятия военно-стратегических решений в СССР. – М.: Империиум Пресс, 2005. – 96 с.

360. *Цыгичко В. Н., Черешкин Д. С.* Сценарный метод прогнозирования и оценки рисков возникновения негативных последствий стратегических решений в организационных системах // Труды ИСА РАН. – 2018. – Том 68, № 4. – С. 74-83.
361. *Цырендоржиев С. Р.* Основы методического подхода к оцениванию военной безопасности с учетом технологических факторов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 25: Международные отношения и мировая политика. – 2015. – № 4. – С. 45-72.
362. *Чепурных И. В.* Динамика полета самолетов: учеб. пособие. – Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 2014. – 112 с.
363. *Черкесов Г. Н.* Методы и модели оценки живучести сложных систем. – М.: Знание, 1987. – 116 с.
364. *Черкесов Г. Н., Недосекин А. О.* Описание подхода к оценке живучести сложных структур при многообразных воздействиях высокой точности // Надежность. – 2016. – № 2. – С. 3-15.
365. *Чернов И. В.* Сценарно-когнитивное моделирование сложных систем на основе событийной идентификации динамики факторов // Проблемы управления. – 2023. – № 3. – С. 65-76.
366. *Чернова Н. И.* Теория вероятностей: учебное пособие. – Новосибирск: НГУ, 2007. – 160 с.
367. *Черноузько Ф. Л.* Одна задача уклонения от многих преследователей // Прикладная математика и механика. – 1976. – Т.40, № 1. – С. 14-24.
368. *Чуев В. Ю.* Стохастизм и детерминизм при моделировании двухсторонних боевых действий // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия естественные науки. – 2017. – № 4 (73). – С. 16-28.
369. *Чуев В. Ю., Дубоград И. В.* Стохастические модели дуэльного боя двух единиц // Математическое моделирование и численные методы. – 2016. – № 10. – С. 69-84.
370. *Чуев В. Ю., Дубоград И. В.* Стохастические модели двусторонних боевых действий многочисленных группировок при линейных зависимостях эффективных скорострельностей боевых единиц сторон от времени боя // Математическое моделирование и численные методы. – 2018. – № 2 (18). – С. 118-128.
371. *Чуев Ю. В.* Исследование операций в военном деле. – М.: Воениздат, 1970. – 256 с.
372. *Чхартишвили А. Г.* Теоретико-игровые модели информационного управления. – М.: ПМСОФТ, 2004. – 227 с.
373. *Шандор З.* Мультиномиальные модели дискретного выбора // Квантиль. – 2009. – № 7. – С. 9-19.
374. *Шеллинг Т.* Стратегия конфликта. Пер. с англ. Т. Даниловой. – М. ИРИСЭН, 2007. – 373 с.
375. *Шикин Е. В., Шикина Г. Е.* Исследование операций: учеб. – М.: ТК Велби, изд-во Проспект, 2006. – 280 с.
376. *Шлыков А. В., Прищеп С. В.* Оценка боевых возможностей группировок войск противовоздушной обороны // Вестник академии военных наук. – 2005. – № 2. – С. 142-147.

377. *Шмелев О. Б.* Метод обоснования рационального состава и построения группировки зенитных ракетных войск на стратегическом направлении // Военная мысль. – 2020. – № 11. – С. 25-32.
378. *Шульц В. Л., Кульба В. В., Шелков А. Б., Чернов И. В.* Сценарный анализ в управлении геополитическим информационным противоборством. – М.: Наука, 2015. – 542 с.
379. *Шульц В. Л., Чернов И. В., Кульба В. В., Шелков А. Б.* Сценарное планирование в управлении обеспечением национальной безопасности: методологические основы // Национальная безопасность / notabene. – 2023. – № 5. – С. 36-61.
380. *Шумейкер П.* Модель ожидаемой полезности: разновидности, подходы, результаты и пределы возможностей // THESIS. – 1994. – Вып. 5. – С. 29-80.
381. *Шумов В. В.* Об одной модели действий пограничного дозора // Труды ИСА РАН. – 2010. – Т. 52. – С. 185–194.
382. *Шумов В. В.* Модели противодействия терроризму: классификация // Труды института системного анализа РАН. – 2012. – Т. 62, № 4. – С. 106-115.
383. *Шумов В. В.* Модели пограничного сдерживания. – М.: ЛЕНАНД, 2012. – 200 с.
384. *Шумов В. В.* Анализ социально-информационного влияния на примере войн США в Корее, Вьетнаме и Ираке // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – Т. 6. – № 1. – С. 167-184.
385. *Шумов В. В.* Иерархические и матричные модели пограничной безопасности / Математическое моделирование. – 2014. – Т. 26, № 3. – С. 137–148.
386. *Шумов В. В.* Пограничная безопасность как ценность и общественное благо: Математические модели. – М.: ЛЕНАНД, 2015. – 192 с.
387. *Шумов В. В.* Анализ процессов интеграции и дезинтеграции в Европейском Союзе // Вопросы безопасности. – 2016. – № 6. – С. 66–82.
388. *Шумов В. В.* Учет психологических факторов в моделях боя (конфликта) // Компьютерные исследования и моделирование. – 2016. – Т. 8. – № 6. – С. 951-964.
389. *Шумов В. В.* Учет морального фактора и технологических характеристик в моделях боя // Военная мысль. – 2020. – № 10. – С. 82–99.
390. *Шумов В. В.* Расширение модели «наступление – оборона» // Проблемы управления / Control Sciences. – 2020. – № 1. – С. 59–70.
391. *Шумов В. В.* Исследование функции победы в бою (сражении, операции) // Проблемы управления / Control Sciences. – 2020. – № 6. – С. 19–30.
392. *Шумов В. В.* Национальная безопасность: моделирование и прогнозирование. – М.: ЛЕНАНД, 2023. – 138 с.
393. *Шумов В. В.* Модели и методики обоснования плотностей пограничных сил, обеспечивающих надежную охрану государственной границы // Управление большими системами: сборник трудов. – 2024. – Вып. 108. – С. 57-77.
394. *Шумов В. В.* Закон поражения целей и функция победы в бою (сражении, операции) // Управление большими системами: сборник трудов. – 2024. – Вып. 109. – С. 21-40.
395. *Шумов В. В., Корепанов В. О.* Исследование теоретико-игровых моделей боевых действий // Математическая теория игр и ее приложения. – 2021. – Т. 13. – Вып. 2. – С. 80–117.
396. *Шумов В. В., Сидоренко А. А., Цезарь Д. А.* Анализ пиратских актов на море и мер по борьбе с ними // Военная мысль. – 2021. – № 9. – С. 113-124.

397. Эльберг М. С., Цыганков Н. С. Имитационное моделирование: учеб. пособие. – Красноярск: СФУ, 2017. – 128 с.
398. Юсупов Р. М., Иванов В. П. Математическое моделирование в военном деле // Военно-исторический журнал. – 1988. – № 9. – С. 79-83.
399. Юсупов Р. М., Иванов В. П. Из истории математического моделирования боевых действий в России (1900-1917 гг.) // Информатика и автоматизация. – 2023. – № 22(5). – С. 947-967.
400. Ягольников С. В., Смирнов А. А. Имитационное моделирование ВКО – искусство и наука // Воздушно-космическая оборона. – 2023. – Вып. 4. – URL: <http://www.vko.ru/konceptcii/imitacionnoe-modelirovanie-vko-iskusstvo-i-nauka> (дата обращения: 20.08.2024).
401. Ярошевский В. А. Решение одной модельной игровой задачи о дальнем воздушном бое // Ученые записки ЦАГИ. – 2004. – Т. XXXV, № 1-2. – С. 68-82.
402. Akinbulire T., Schwartz H., Falcon R., Abielmona R. A Reinforcement Learning Approach to Tackle Illegal, Unreported and Unregulated Fishing // IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications. – 2017. – P. 1-8.
403. Alesina A. The size of nations. – Cambridge, Mass.: MIT Press, 2003. – 261 p.
404. Alesina A., Spolaore E. War, peace, and the size of countries // Journal of Public Economics. – 2005. – No. 89. – P. 1333 – 1354.
405. Alesina A., Spolaore E., Wacziarg R. Economic Integration and Political Disintegration. – Cambridge, MA: National bureau of economic research, 1997. – 48 p.
406. Alesina A., Spolaore E., Wacziarg R. Trade, Growth and the Size of Countries // Handbook of Economic Growth. – 2005. – Vol. 1B. – P. 1499-1542.
407. Algorithmic Game Theory / Eds. Nisan N., Roughgarden T., Tardos E., and Vazirani V. – N.Y.: Cambridge University Press, 2009. – 776 p.
408. Alpern S., Bui T., Lidbetter T., Papadaki K. Continuous Patrolling Games // Operations Research. – 2022. – No. 70(6). – P. 3076-3089.
409. Alpern S., Morton A., Papadaki K. Patrolling Games // Operational Research. – 2011. – Vol. 59, No. 5. – P. 1246–1257.
410. An B., Ordóñez F., Tambe M., Shieh E., Yang R., Baldwin C., DiRenzo J., Moretti K., Maule B., Meyer G. A Deployed Quantal Response-Based Patrol Planning System for the U.S. Coast Guard // Interfaces. – 2013. – Vol. 43, No. 5. – P. 400–420.
411. Arabas P., Malinowski K. Coordination strategies for hierarchical missile defense system // IFAC Proceedings Volumes. – 2007. – Vol. 40, Iss. 9. – P. 362-367.
412. Argueta C. N. Border Security Metrics Between Ports of Entry. – Washington: Congressional Research Service, 2016. – 19 p.
413. Army Field Manual No. FM 3-0: FM 3-0 Operations (2022).
414. Artelli M. J., Deckro R. F. Modeling the Lanchester Laws with System Dynamics // The Journal of Defense Modeling and Simulation Applications Methodology Technology. – 2008. – No. 5(1). – P. 1-20.
415. Ascough J. C., Maier H. R., Ravalico J. K., Strudley M. W. Future research challenges for incorporation of uncertainty in environmental and ecological decision-making // Ecological Modeling. – 2008. – №219 (3-4). – P. 383-399.
416. Bakshi N., Pinker E. Public warnings in counterterrorism operations: Managing the “cry-wolf” effect when facing a strategic adversary // Operations Research. – 2018. – No. 66 (4). – P. 977–993.

417. *Baron O., Berman O., Gavious A.* A game between a terrorist and a passive defender // *Production and Operations Management*. – 2018. – No. 27 (3). – P. 433–457.
418. *Bellman R. E.* The Theory of Dynamic Programming // *Bulletin of the American Mathematical Society*. – 1954. – No. 60. – P. 503–516.
419. *Bellman R.E.* Dynamic Programming and a New Formalism in the Calculus of Variations // *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.* – 1954. – No. 40. – P. 231–235.
420. *Berkovitz L. D.* A variational approach to differential games. – RAND Report RM-2772, 1961.
421. *Bertalanffy L.* The Theory of Open Systems in Physics and Biology // *Science*. – 1950. – 13 Jan. – Vol. 111. – P. 23 – 29.
422. Best Management Practices to Deter Piracy and Enhance Maritime Security in the Red Sea, Gulf of Aden, Indian Ocean and Arabian Sea. – Version 5. – Scotland, UK: Witherby Publishing Group Ltd, 2018. – 70 p.
423. *Beyer U., Doll T., Schiller T.* Armed Conflicts in the 21st Century. novumbellum.org, 2022. – 72 p.
424. *Bonder S.* Army Operations Research – Historical Perspectives and Lessons Learned // *Operations Research*. – 2002. – No. 50(1). – P. 25-34.
425. *Bowers A., Prochnow D. L.* Multi-Resolution Modeling in the JTLS-JCATS Federation. – MITRE Corporation, 2003. – 11 p.
426. *Brown G., Carlyle M., Diehl D., Kline J., Wood K.* A two-sided optimization for theater ballistic missile defense // *Operations research*. – 2005. – No. 53(5). – P.745-763.
427. *Brown G., Carlyle M., Salmerón J., Wood K.* Defending Critical Infrastructure // *Interfaces*. – 2006. Vol. 36, No. 6. – P. 530–544.
428. *Brown M., An B., Kiekintveld C., Ordóñez F., Tambe M.* An extended study on multi-objective security games // *Auton Agent Multi-Agent Syst*. – 2014. – No. 28. – P. 31–71.
429. *Bucarey V., Casorrán C., Figueroa Ó., Rosas K., Navarrete H., Ordóñez F.* Building Real Stackelberg Security Games for Border Patrols // *Decision and Game Theory for Security*. – 2017. – P. 193-212.
430. *Bueno de Mesquita B.* Game Theory, Political Economy and the Evolving Study of War and Peace // *American Political Science Review*. – 2006. – Vol. 100. – №4. – P. 637–642.
431. *Buzikov M. E., Galyaev A. A.* Minimum-time lateral interception of a moving target by a Dubins car // *Automatica*. – 2022. – Vol. 135. 109968.
432. *Camerer C.* Behavioral Game Theory: Experiments in Strategic Interactions. – Princeton: Princeton University Press, 2003. – 544 p.
433. *Cameron S.* The Economics of Crime Deterrence: A Survey of Theory and Evidence // *KYKLOS*. – 1988. – Vol. 41. – Fasc. 2. – P. 301–323.
434. *Cangiotti N., Capolli M., Sensi M.* A generalization of unaimed fire Lanchester’s model in multi-battle warfare // *Operational Research*. – 2023. – Vol. 23, No. 38. – DOI: 10.1007/s12351-023-00776-8.
435. *Cardoso F. A., Abrahão F. T. M., Saba W. B.* Resources Package Modelling Supporting Border Surveillance Operations // *Defence Science Journal*. – 2021. – Vol. 71, No. 3. – P. 410-417.

436. *Casorran C., Fortz B., Labbé M., Ordóñez F.* A study of general and security Stackelberg game formulations // *European Journal of Operational Research.* – 2019. – No. 278(3). 2019.05.012.
437. *Cebrowski A. K., Garstka J. J.* Network-centric Warfare: Its Origin and Future // *Proceedings Magazine.* – 1998. – No 124(1). – P. 28-35.
438. *Christensen K.* Percolation Theory. – London: Blackett Laboratory, 2002. – 39 p.
439. *Chuang Y., D'Orsogna M. R.* Mathematical Models of Radicalization and terrorism. – 2019. – arXiv preprint arXiv:1903.08485.
440. *Clauset A., Wiegand F. W.* A generalized aggregation-disintegration model for the frequency of severe terrorist attacks // *Journal of Conflict Resolution.* – 2010. – No. 54(1). – P. 179–197.
441. *Cobb C. W., Douglas P. H.* A Theory of Production // *Amer. Econ. Rev. Suppl.* – 1928. – Vol. 18. March. – P. 139–165.
442. *Cohen L. E., Felson M.* Social Change and Crime Rate Trends: a Routine Activities Approach // *American Sociological Review.* – 1979. – Vol. 44, No. 4. – P. 588-608.
443. *Connable B., Perry W. L., Doll A., Lander N., Madden D.* Modeling, Simulation, and Operations Analysis in Afghanistan and Iraq. Report of RAND, 2014. – 188 p.
444. Counterair Operations – U.S. Air Force Doctrine. – 2019. – 42 p.
445. *Dabrowski J. J., De Villiers J. P.* Maritime piracy situation modelling with dynamic Bayesian networks // *Information Fusion.* – 2015. – No. 23. – P. 116-130.
446. *Deitchman S.* A Lanchester model of guerrilla war // *Operational Research.* – 1962. – No. 10. – P. 818–827.
447. *Delle Fave F.M., Jiang A.X., Yin Z., Zhang C., Tambe M., Kraus S., Sullivan J. P.* Game-Theoretic Security Patrolling with Dynamic Execution Uncertainty and a Case Study on a Real Transit System // *Journal of Artificial Intelligence Research.* – 2014. – No. 50. – P. 321-367.
448. *Dighe N. S., Zhuang J., Bier V. M.* Secrecy in Defensive Allocations as a Strategy for Achieving More Cost-Effective Attacker Deterrence // *International Journal of Performability Engineering.* – 2009. – No. 5(1). – P. 31–43.
449. *Dong Y., Ai J., Liu J.* Guidance and control for own aircraft in the autonomous air combat: A historical review and future prospects // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering.* – 2019. – No. 233(16). – P. 5943-5991.
450. *Duan Z., Xu G., Liu X., Ma J., Wang L.* Optimal confrontation position selecting games model and its application to one-on-one air combat // *Defence Technology.* – 2024. – No. 31. – P. 417-428.
451. *Edwards W.* The Prediction of Decisions Among Bets // *Journal of Experimental Psychology.* – 1955. – Vol. 50. – P. 201–214.
452. *Ellenberg J.* How Not to Be Wrong: The Hidden Maths of Everyday Life. – Penguin UK, 2014. – 480 p.
453. *Eloy G., Casbeer D. W., Pachter M.* Active Target Defense Differential Game with a Fast Defender // *IET Control Theory and Applications.* – 2017. – V. 17, № 11. – P. 2985–2993.
454. *Encyclopedia of Operations Research and Management Science / Ed. by Saul I. Gass, Carl M. Harris.* – Springer Science & Business Media, 2012. – 753 p.
455. *Ethier W. J.* Illegal Immigration: The Host-Country Problem // *American Economic Review.* – 1986. – Vol. 76(1). – P. 56-71.

456. *Fan H., Lu J., Chang Z.* A risk-based game theory model of navy and pirate behaviors // *Ocean & Coastal Management*. – 2022. – Vol. 225. – 106200.
457. *Fang F., Stone P., Tambe M.* When Security Games Go Green: Designing Defender Strategies to Prevent Poaching and Illegal Fishing // *International Joint Conference on Artificial Intelligence*. – 2015. – P. 2589-2595.
458. *Fradkov A.* International Stability under Iterated Sanctions and Counter-sanctions // *Preprints of the 22nd IFAC World Congress, Yokohama, Japan, July 9-14, 2023*. – P. 11832-11836.
459. *Galyaev A. A., Lysenko P. V., Rubinovich E. Y.* Optimal Stochastic Control in the Interception Problem of a Randomly Tacking Vehicle // *Mathematics*. – 2021. – 9(19):2386. DOI: 10.3390/math9192386.
460. *Ghose D., Krichman M., Speyer J., Shamma J.* Modeling and analysis of air campaign resource allocation: A spatio-temporal decomposition approach // *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics - Part A Systems and Humans*. – 2002. – NO. 32(3). – P. 403-418.
461. Global Innovation Index 2023 Edition. – URL: <http://www.globalinnovationindex.org/> (дата обращения: 06.01.2023).
462. *Granovetter M.* Threshold Models of Collective Behavior // *AJS*. – 1978. – Vol.83, No. 6. – P. 1420–1443.
463. *Grossman H. I., Mendoza J.* Annexation or conquest? The economics of empire building // *SSRN Electronic Journal*. – 2001. – DOI: 10.2139/ssrn.310602.
464. *Gunzinger M. A., Stutzriem L. A., Sweetman B.* The Need for Collaborative Combat Aircraft for Disruptive Air Warfare. – Arlington, VA: Mitchell Institute for Aerospace Studies, 2024. – 48 p.
465. *Gutfraind A.* Mathematical terrorism. A Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy. – Cornell University, 2010. – 139 p.
466. *Haddal C. C.* Border Security: The Role of the U.S. Border Patrol. – Washington D.C.: Library of Congress. Congressional Research Service, 2010. – 40 p.
467. *Han Q., Li W., Qiling X. U., Minrui Z., Runze H., Tao Z.* Lanchester equation for cognitive domain using hesitant fuzzy linguistic terms sets // *Journal of Systems Engineering and Electronics*. – 2022. – Vol. 33, Is. 3. – P. 674-682.
468. *Han Q., Pang B., Li S., Li N., Guo P., Fan C., Li W.* Evaluation method and optimization strategies of resilience for air & space defense system of systems based on kill network theory and improved self-information quantity // *Defence Technology*. – 2023. – Vol. 21. – P. 219-239.
469. *Handa J.* Risk, Probabilities and a New Theory of Cardinal Utility // *Journal of Political Economy*. – 1977. – Vol. 85. – No.1. – P. 97–122.
470. *Harsanyi J. C.* Games with Incomplete Information Played by Bayesian Players, I-III. Part I. The Basic Model // *Management science*. – 1967. – Vol. 14, No. 3. – P. 159-182.
471. *Hartley D. S., Lacey L., Works P.* «IW Ontologies» briefing, INFORMS National Meeting, Charlotte, N.C., November, 2011. – RAND RR382-5.4.
472. *Haskell W., Kar D., Fang F., Tambe M., Cheung S., Denicola E.* Robust Protection of Fisheries with COMPASS // *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. – 2014. – Vol. 28(2). – P. 2978-2983.
473. *Hausken K.* Fifty Years of Operations Research in Defense // *European Journal of Operational Research*. – 2023. – j.ejor.2023.12.023.

474. *Helmbold R. L., Rehm A. S.* The influence of the numerical strength of engaged forces in their casualties, by M. Osipov // *Naval Research Logistics (NRL)*. – 1995. – Vol. 42(3). – P. 435-490.
475. *Hestenes M. R.* Numerical Methods for Obtaining Solutions of Fixed End Point Problems in the Calculus of Variations. – Research Memorandum No. 102. – RAND Corporation, Santa Monica, 1949.
476. *Hestenes M. R.* A General Problem in the Calculus of Variations with Applications to the Paths of Least Time. – Research Memorandum No. 100, ASTIA Document No. AD 112382. – RAND Corporation, Santa Monica, 1950.
477. *Ho E., Rajagopalan A., Skvortsov A., Arulampalam S., Piraveenan M.* Game Theory in Defence Applications: A Review // *Sensors*. – 2022. – No. 22 (3). – <https://doi.org/10.3390/s22031032>.
478. *Hogwood B. W., Gunn L. A.* Policy analysis for the real world. – New York: Oxford University Press, 1984. – 289 p.
479. *Howard N.* Theory of Meta-Games // *General systems*. – 1966. – №11. – P. 187–200.
480. *Hu X., Xia H., Xuan S., Hu S.* Exploring the Pirate Attack Process Risk along the Maritime Silk Road via Dynamic Bayesian Network Analysis // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2023. – No. 11, 1430.
481. *Hunt K., Zhuang J.* A review of attacker-defender games: Current state and paths forward // *European Journal of Operational Research*. – 2024. – No. 313. – P. 401–417.
482. *Isaacs R. P.* Games of Pursuit. – Paper No. P-257. – RAND Corporation, Santa Monica, 1951.
483. *Jackson M., Morelli M.* The Reasons for Wars // *Handbook on the Political Economy of War* / Eds. C. Coyne, R. Mathers. – Northampton: Elgar Publishing, 2011. – 704 p.
484. *Jain A. K., Satsrisakul Y., Fehling-Kaschek M., Häring I., van Rest J.* Towards Simulation of Dynamic Risk-Based Border Crossing Checkpoints // 30th European Safety and Reliability Conference (ESREL 2020). – 2020. – P. 4446-4452.
485. *Jia H., Skaperdas S., Vaidya S.* Contest functions: Theoretical foundations and issues in estimation // *International Journal of Industrial Organization*. – 2013. – No. 31. – P. 211–222.
486. *Jia N., Yang Z., Yang K.* Operational Effectiveness Evaluation of the Swarming UAVs Combat System Based on a System Dynamics Model // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 25209-25224.
487. *Johnson D. D. P., MacKay N. J.* Fight the power: Lanchester's laws of combat in human evolution // *Evolution and Human Behavior*. – 2015. – No. 36. – P. 152–163.
488. *Johnson N. F., Restrepo E. M., Johnson D. E.* Modeling human conflict and terrorism across geographic scales / In *Social Phenomena: From Data Analysis to Models*, 2015. – Springer, p. 209-233.
489. *Joines J. A., Barton R. R., Kang K., Fishwick P. A., Taylor J. G., Yildirim U. Z., Murphy W. S.* Hierarchy-of-models approach for aggregated-force attrition // *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*. – 2001. – P. 925-932.
490. *Jordan J.* The future of unmanned combat aerial vehicles: An analysis using the Three Horizons framework // *Futures*. – 2021. – No. 134. 102848.
491. *Jung W. I.* A Methodology on Weapon Combat Effectiveness Analytics using Big Data and Live, Virtual, or/and Constructive Simulations // *Electronic Theses and Dissertations*. – 2018. – 5889. – 174 p.

492. *Kahn H.* On escalation: Metaphors and scenarios. – New York: Praeger, 1965. – 308 p.
493. *Kahn H., Wiener A.* The year 2000: A framework for speculations on the next 33-year. – New York: Macmillan, 1967. – 431 p.
494. *Kahneman D., Tversky A.* Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk // *Econometrica*. – 1979. – Vol. XLVII. – P. 263-291.
495. *Kalloniatis A. C., Keeley H., Zuparic M., Brede M.* Optimising structure in a networked Lanchester Model for Fires and Manoeuvre in Warfare // *Journal of the Operational Research Society*. – 2020. – Vol. 72, Is. 8. – P. 1863-1878.
496. *Kar D., Nguyen T. H., Fang F., Brown M., Sinha A., Tambe M., Jiang A. X.* Trends and Applications in Stackelberg Security Games / *Handbook of Dynamic Game Theory*. – Springer, 2018. – P. 1223-1269.
497. *Karmarkar U. S.* Subjectively Weighted Utility: A Descriptive Extension of the Expected Utility Model // *Organizational Behavior and Human Decision Processes*. – 1978. – Vol. 21, no. 1. – P. 61-72.
498. *Keane T.* Combat modelling with partial differential equations // *Appl. Math. Model.* – 2011. – No. 35. – P. 2723–2735.
499. *Khuwaja K., Lighari N., Tarca I. C., Tarca R. C.* PID Controller Tuning Optimization with Genetic Algorithms for a Quadcopter // *Recent Innovations in Mechatronics (RIIM)*. – 2018. – Vol. 5, No. 1. – 7 p.
500. *Kim D., Moon H., Park D., Shin H.* An efficient approximate solution for stochastic // *Oper. Res. Soc.* – 2017. – No. 68. – P. 1470–1481.
501. *Komlos J., Nefedov S.* A Compact Macromodel of Pre-Industrial Population Growth // *Historical Methods*, 2002. – Vol. 35, № 2. – P. 92–93.
502. *Koopman B. O.* The theory of search, I-III / *Operat. Res.* – 1956. – No. 4. – P. 324-346, 503-531; 1957. – No. 5. – P. 613-626.
503. *Korzhyk D., Yin Z., Kiekintveld C., Conitzer V., Tambe M.* Stackelberg vs. Nash in Security Games: An Extended Investigation of Interchangeability, Equivalence, and Uniqueness // *Journal of Artificial Intelligence Research*. – 2011. No. 41. – P. 297-327.
504. *Kostić M., Jovanović A.* Modeling of real combat operations // *Journal of Process Management and New Technologies*. – 2023. – Vol. 11, Is. 3-4. – P. 39-56.
505. *Kress M.* Lanchester Models for Irregular Warfare // *Mathematics*. – 2020. – No. 8(5): 737.
506. *Labati R. D., Genovese A., Muñoz E., Piuri V., Scotti F., Sforza G.* Biometric Recognition in Automated Border Control: A Survey // *ACM Computing Surveys*. – 2016. – Vol. 49, iss. 2, article 24. – P. 1-39.
507. *Lai K., Yanushkevich S. N., Shmerko V. P., Eastwood S. C.* Bridging the Gap Between Forensics and Biometric-Enabled Watchlists for e-Borders // *IEEE Computational Intelligence Magazine*. – 2017. – Vol. 12, no. 1. – P. 16-28.
508. *Lanchester F.* Aircraft in Warfare: the Dawn of the Fourth Arm. – London: Constable and Co., 1916. – 243 p.
509. Latin American adjustment: how much has happened. / Ed. by J. Williamson. – Washington DC: Institute for International Economics XV, 1990. – 445 p.
510. *Lei X., Hu X., Wang G., Luo H.* A multi-UAV deployment method for border patrolling based on Stackelberg game // *Journal of Systems Engineering and Electronics*. – 2023. – Vol. 34, No. 1. – P. 99 – 116.

511. *Leonard T., Lee E. K.* US-Mexico Border: Building a Smarter Wall through Strategic Security Measure Allocation // *Journal of Strategic Innovation and Sustainability*. – 2020. – Vol. 15(1). – P. 156-182.
512. *Li N., Su Z., Ling H., Karatas M., Zheng Y.* Optimization of Air Defense System Deployment Against Reconnaissance Drone Swarms // *Complex System Modeling and Simulation*. – 2023. – Vol. 3 (2). – P. 102-117.
513. *Lin K. Y., Atkinson M. P., Chung T. H., Glazebrook K. D.* A Graph Patrol Problem with Random Attack Times // *Operations Research*. – 2013. – Vol. 61, No. 3. – P. 694–710.
514. *Lin K. Y., MacKay N. J.* The optimal policy for the one-against-many heterogeneous lanchester model // *Oper. Res. Lett.* – 2014. – No. 42. – P. 473–477.
515. *Liu Y., Liu Z., Shi J., Wu G., Chen C.* Optimization of Base Location and Patrol Routes for Unmanned Aerial Vehicles in Border Intelligence, Surveillance and Reconnaissance // *Journal of Advanced Transportation*. – 2019. – Article ID 9063232. – 13 p.
516. *Luce R. D.* Individual Choice Behavior: A Theoretical Analysis. – New York: Wiley, 1959. – 176 p.
517. *Ma Y., Ma X., and Song X.* A Case Study on Air Combat Decision Using Approximated Dynamic Programming // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2014. – 10 p.
518. *Maddison A.* The World Economy: A Millennial Perspective. – Paris: OECD, 2006. – 667 p.
519. *Magruk A.* Uncertainties, knowledge, and futures in foresight studies – A case of the Industry 4.0. // *Foresight and STI Governance*. – 2020. – Vol. 14, № 4. – P. 20–33.
520. *Major J.* Advanced Techniques for Modeling Terrorism Risk // *The Journal of Risk Finance*. – 2002. – No. 4(1). – P. 15-24.
521. *Mao Y., Chen Z., Yang Y., Hu Y.* A novel adaptive heuristic dynamic programming-based algorithm for aircraft confrontation games // *Fundamental Research*. – 2021. – No. 1. – P. 792-799.
522. *Megahed A. El-M.* A differential Game Related to Terrorism: Stackelberg Differential Game of E-differentiable and E-convex Function // *European Journal of Pure and Applied Mathematics*. – 2019. – No. 12(2). – P. 654-667.
523. *Meissner D., Kerwin D. M., Chishti M., Bergeron C.* Immigration Enforcement in the United States: The Rise of a Formidable Machinery. – Washington: Migration Policy Institute, 2013. – 175 p.
524. *Memon N., Faley J. D., Hicks D. L.* Mathematical Methods in Counterterrorism / Editors T. Rosenorn. – Springer-Verlag/Wien, 2009. – 389 p.
525. *Michalski D., Radomyski A.* Counting the Uncountable: Introduction to the New Method of Evaluation of the Efficiency of Air Defense // *Safety & Defense*. – 2021. No. 6(2). – P. 100-112.
526. *Mitchell B. R.* European historical statistics 1750–1970. – New York; London: Columbia Univ., 1978. – 446 p.
527. *Moritz K., Polis R., Well K. H.* Pursuit-evasion in medium-range air-combat scenarios // *Computers & Mathematics with Applications*. – 1987. – Vol. 13, No. 1-3. – P. 167-180.
528. *O'Neill B.* A Survey of Game Theory Models on Peace and War. –Toronto: York University, Centre for International and Strategic Studies, 1990. – 57 p.

529. *Nguyen C. M., Le T. Q.* Impact of piracy on maritime transport and technical solutions for prevention // *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. – 2019. – Vol. 10, No. 1. – P. 958–969.
530. *Palumbo N. F., Blauwkamp R. A., Lloyd J. M.* Modern Homing Missile Guidance Theory and Techniques // *Homing missile guidance and control*. – 2010. – V. 29. 1.
531. *Papadaki K., Alpern S., Lidbetter T., Morton A.* Patrolling a Border // *Operations Research*. – 2016. – Vol. 64, No. 4. – P. 1256-1269.
532. *Peng Q, Wu H, Xue R.* Review of Dynamic Task Allocation Methods for UAV Swarms Oriented to Ground Targets // *Complex System Modeling and Simulation*. – 2021. – Vol. 1, No.3. – P. 163-175.
533. *Pita J., Jain M., Marecki J., Ordóñez F., Portway C., Tambe M., Western C., Paruchuri P., Kraus S.* Deployed ARMOR Protection: The Application of a Game Theoretic Model for Security at the Los Angeles International Airport // *Proc. of 7th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. – 2008. – P. 125-132.
534. *Pita J., Tambe M., Kiekintveld C., Cullen S., Steigerwald E.* GUARDS - Game Theoretic Security Allocation on a National Scale // *Proc. of 10th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems – Innovative Applications Track*. – 2011. – DOI: 10.1017/CBO9780511973031.006.
535. *Poulshock M.* National Power as Network Flow // *SSRN Electronic Journal*. – January 2022. – DOI: 10.2139/ssrn.4209411.
536. *Poundstone W.* Prisoner's Dilemma. – New York: Anchor Books, 1992. – 290 p.
537. *Qin B., Zhang D., Tang S., Wang M.* Distributed Grouping Cooperative Dynamic Task Assignment Method of UAV Swarm // *Applied Sciences*. 2022. – No. 12(6):2865.
538. *Quiggin J.* A Theory of Anticipated Utility // *Journal of Economic Behavior & Organization*. – 1982. – Vol. 3. – Issue 4. – P. 323-343.
539. *Ramteke V., Comandur V., Makkapati V. R., Kothari M.* A Game-Theoretic Model for One-on-One Air Combat // *IFAC-PapersOnLine*. – 2022. – Vol. 55(22). – P. 261-267.
540. *Reach C., Kilambi V., Cozad M.* Russian Assessments and Applications of the Correlation of Forces and Means. – Santa Monica: RAND Corporation, 2020. – 172 p.
541. *Reilly W. J.* The law of retail gravitation. – New York, 1931. – 75 p.
542. *Richardson L. F.* Variation of the frequency of fatal quarrels with magnitude // *Journal of the American Statistical Association*. – 1948. – No. 43. – P. 523–546.
543. *Riley J., Lelong M.* Fluid motions in the presence of Strong Stable Stratification // *Annu. Rev. Fluid Mech*, 2000. – P. 613-657.
544. *Roberts B., Alden E., Whitley J.* Managing Illegal Immigration to the United States: How Effective Is Enforcement? – New York: Council on Foreign Relations, 2013. – 64 p.
545. *Roberts M.* The Military Revolution, 1560-1660. – M. Boyd, 1956. – 32 p.
546. *Rosenau James N.* Turbulence in world politics: A theory of change a. continuity. – Princeton (N. J.): Princeton univ. press, Cop. 1990. – XVIII, 480 p.
547. *Rosenblum M. R.* Border Security: Immigration Enforcement Between Ports of Entry. – Congressional Research Service, 2012. – 46 p.
548. *Rosenblum M. R., Hipsman F.* Border metrics: How to Effectively Measure Border Security and Immigration Control. – Washington: Migration Policy Institute, 2016. – 35 p.

549. *Rossmo D. K.* Geographic profiling: Target Patterns of Serial Murderers / PhD thesis. – Simon Fraser University, 1995. – 550 p.
550. *Rubinovich E. Y.* Two Targets Pursuit-Evasion Differential Game with a Restriction on the Targets Turning // IFAC-PapersOnLine. - 2018. P. 503–508.
551. *Rubinovich E. Y.* Missile-Target-Defender Problem with Incomplete a priori Information // Dynamic Games and Applications (Special Issue). – 2019. – DOI: 10.1007/s13235-019-00297-0.
552. *Sabuncuoglu I., Virlan G.* Modeling and analyzing army air assault operations via simulation // SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International. – 2011. – No. 87(11). – P. 1002-1014.
553. *Savage L. J.* The Foundations of Statistics. – New York: Wiley, 1954. – 294 p.
554. *Schilling G. F.* Analytic model of border control. – Santa Monica: Rand, 1970. – 69 p.
555. *Schneeweiss H.* Probability and Utility – Dual Concepts in Decision Theory / In: G. Menges (ed.). Information, Inference and Decision. – Dordrecht: D. Reidel, 1974. – P. 113–144.
556. *Shakarian P., Dickerson J., Subrahmanian V.* Adversarial Geospatial Abduction Problems // ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology. – 2012. – Vol. 3(2). – P. 34:1–34:35.
557. *Shieh E., An B., Yang R., Tambe M., Baldwin C., DiRenzo J., Maule B., Meyer G.* PROTECT: A deployed game theoretic system to protect the ports of the United States // Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. – 2012. – Vol. 1. – P. 13–20.
558. *Singer J. D., Bremer S., Stuckey J.* Capability Distribution, Uncertainty, and Major Power War, 1820–1965 / In: B. Russett (ed). Peace, War, and Numbers. – Beverly Hills: Sage, 1972. – P. 19–48.
559. *Skaperdas S.* Contest success functions // Economic Theory. – 1996. – No. 7. – P. 283–290.
560. *Smah M. L.* Mathematical model of terrorism: case study of Boko Haram // Int. J. Mathematical Modelling and Numerical Optimisation. – 2022. – Vol. 12, No. 1. – P. 88–112.
561. *Spradlin C., Spradlin G.* Lanchester's equations in three dimensions // Computers and Mathematics with Applications. – 2007. – No. 53. – P. 999–1011.
562. *Stein T. N.* Border security: a conceptual model of complexity. – Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2013. – 135 p.
563. Structure of Decision: The Cognitive Maps of Political Elites. / Ed. by Robert Axelrod. – Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1976. – 422 p.
564. *Sulek M.* Measurement of national power – a powermetric model // Przegląd Geopolityczny. – 2020. – № 32. – P. 35-57.
565. *Talha M., Asghar F., Rohan A., Rabah M., Kim S. H.* Fuzzy Logic-Based Robust and Autonomous Safe Landing for UAV Quadcopter // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2018. – No. 44(8). – 13 p.
566. *Taylor G. J.* Lanchester-Type Models of Warfare. – Monterey California: Naval Postgraduate School, 1980. Vol. I. – 606 p.; Vol. II. – 814 p.
567. The Military Balance 2013. – London: Routledge, 2020. – 510 p.
568. *Tolk A.* Tutorial on the engineering principles of combat modeling and distributed simulation // Proceedings of the 2019 Winter Simulation Conference. – P. 18-32.

569. *Tullock G.* The welfare costs of tariffs, monopoly and theft // *Western Economic Journal.* – 1967. – No. 5. – P. 224-232.
570. *Tutun S., Wang H., Liu Z., Yildirim M. F., Khanmohammadi S.* An Agent Based Approach for Understanding Complex Terrorism Behaviors // *Industrial and Systems Engineering Research Conference.* – 2016. – 6 p.
571. *Udwadia F., Leitmann G., Lambertini L.* A dynamical model of terrorism // *Discrete Dynamics in Nature and Society.* – 2006. – Vol. 11. – P. 1-32.
572. *Wang C., Wu A., Hou Y., Liang X., Xu L., Wang X.* Optimal deployment of swarm positions in cooperative interception of multiple UAV swarms // *Digital Communications and Networks.* – 2023. – No. 9. – P. 567–579.
573. *Wang E., Liu F., Hong C., Guo J., Zhao L., Xue J., He N.* MADRL-based UAV swarm non-cooperative game under incomplete information // *Chinese Journal of Aeronautics.* – 2024. – Vol. 37, Iss. 6. – P. 293-306.
574. *Wang J., Duan S., Ju S., Lu S., Jin Y.* Evolutionary Task Allocation and Cooperative Control of Unmanned Aerial Vehicles in Air Combat Applications // *Robotics.* – 2022. – No. 11, 124.
575. *Washburn A., Kress M.* *Combat Modeling.* – New York : Springer, 2009. – 280 p.
576. *Wein L. M., Liu Y., Motskin A.* Analyzing the Homeland Security of the U.S.-Mexico Border // *Risk Analysis.* – 2009. – Vol. 29 (5). – P. 699-713.
577. *Wiener N.* *Cybernetics: or the Control and Communication in the Animal and the Machine.* – Cambridge: The Technology, 1948. – 194 p.
578. *Willis H. H., Predd J. B., Davis P. K., Brown W.* *Measuring the Effectiveness of Border Security Between Ports-of-Entry.* – Santa Monica, Calif.: RAND Corporation, 2011. – 68 p.
579. *Wright P. D., Liberatore M. J., Nydick R. L.* A Survey of Operations Research Models and Applications in Homeland Security // *Interfaces.* – 2006. – Vol. 36, No. 6. – P. 514-529.
580. *Wrzaczek S., Kaplan E. H., Caulkins J. P., Seidl A., Feichtinger G.* Differential Terror Queue Games // *Dynamic Games and Applications.* – 2017. – Vol. 7(4). – P. 578-593.
581. *Wu X., Gao Z., Yuan S., Hu Q., Dang Z.* A Dynamic Task Allocation Algorithm for Heterogeneous UUV Swarms // *Sensors.* – 2022. – No. 22, 2122.
582. *Yao Z., Li M., Chen Z., Zhou R.* Mission decision-making method of multi-aircraft cooperatively attacking multi-target based on game theoretic framework // *Chinese Journal of Aeronautics.* – 2016. – Vol. 29, Iss. 6. – P. 1685-1694.
583. *Yazar J., Gitter R. J.* Border Games: A Game Theoretic Model of Undocumented Immigration // *Games.* – 2023. – Vol. 14 (5). – P. 1-58.
584. *Yu Z., Jing C., Lincheng S.* Real-time trajectory planning for UCAV air-to-surface attack using inverse dynamics optimization method and receding horizon control // *Chinese Journal of Aeronautics.* – 2013. – No. 26(4). – P. 1038-1056.
585. *Zarghani S. H.* *Measurement of National Power: Definitions, Functions, Measurement.* – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2010. – 120 p.
586. *Zhang J., Han K., Zhang P., Hou Z., Ye L.* A survey on joint-operation application for unmanned swarm formations under a complex confrontation environment // *Journal of Systems Engineering and Electronics.* – 2023. – Vol. 34, No. 6. – P. 1432 – 1446.

587. *Zhang X., Ding S., Ge B., Xia B., Pedrycz W.* Resource allocation among multiple targets for a defender-attacker game with false targets consideration // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2021. – No. 211 (11): 107617.
588. *Zheng Z., Duan H.* UAV maneuver decision-making via deep reinforcement learning for short-range air combat // *Intelligence & Robotics*. – 2023. – Vol. 3 (1). – P. 76-94.
589. *Zhuang J., Bier V. M.* Balancing terrorism and natural disasters –Defensive strategy with endogenous attacker effort // *Operations Research*. – 2007. – No. 55 (5). – P. 976–991.
590. *Zhuang J., Bier V. M., Alagoz O.* Modeling secrecy and deception in a multiple-period attacker–defender signaling game // *European Journal of Operational Research*. – 2010. – No. 203 (2). – P. 409–418.