

Российская Академия наук  
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики  
имени академика Н.П. Лавёрова РАН

**А.Г. Тутыгин, Е.О. Антипов, В.Б. Коробов**

**ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ЛОГИСТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ  
В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Архангельск  
2020

УДК 656.07.(985)  
ББК 65.37-81+65.374-81  
Т 91

*Монография подготовлена в рамках темы НИР «Разработка и обоснование системы показателей для целей моделирования сбалансированного социально-экономического развития арктических территорий» (0409-2019-0035) № гос. регистрации – АААА-А19-119020490098-1*

*Рекомендована к изданию на совместном заседании лабораторий Института комплексных исследований Арктики ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Российской академии наук» (протокол № 11 от 20.12.2019)*

*Рецензенты:*

**Королева Елена Арсентьевна**, заведующий кафедрой Транспортной логистики ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова», д-р эконом. наук, профессор;

**Меньшикова Татьяна Викторовна**, доцент кафедры математики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», канд. эконом. наук, доцент

Т 91

**Проблемы моделирования логистических операций в Арктической зоне Российской Федерации:** монография: [16+]/ А.Г. Тутьгин, Е.О. Антипов, В.Б. Коробов; Рос. акад. наук, М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. исслед. центр комплекс. изучения Арктики им. акад. Н.П. Лаверова РАН. – Архангельск: КИРА, 2020. – 244 с.: ил., табл.  
ISBN 978-5-98450-678-6

В монографии рассмотрены проблемы, возникающие при моделировании логистических операций в Арктической зоне Российской Федерации. Выполненный авторами анализ существующих моделей показал, что для их применения в условиях Северного Ледовитого океана и его морей существует ряд серьезных ограничений. На основе метода потенциалов, предложенного Л.В. Канторовичем, комбинаторных задач и экспертных технологий разработаны алгоритмы решения задач выгрузки с судна на берег, оптимизации маршрута судов и принятия стратегических решений при выборе места и трасс размещения объектов нефтяной транспортной инфраструктуры. Приведены практические примеры реализации этих моделей для Северного завоза, размещения морских нефтяных терминалов и магистральных трубопроводов.

Монография рассчитана на специалистов в области организации транспортировки грузов в АЗРФ, студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

УДК 656.07.(985)  
ББК 65.37-81+65.374-81

ISBN 978-5-98450-678-6

© А.Г. Тутьгин, 2020  
© Е.О. Антипов, 2020  
© В.Б. Коробов, 2020  
© Изд-во «КИРА», 2020

## Оглавление

Введение .....	4
Часть 1. ТРАНСПОРТНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА АЗРФ.....	7
Глава 1. АЗРФ как транспортный коридор .....	7
Глава 2. Портовая инфраструктура.....	10
Глава 3. Железнодорожный, автомобильный, трубопрово- дный и авиационный транспорт .....	23
Часть 2. ОСОБЕННОСТИ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ И ЭКОЛО- ГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ .....	39
Глава 4. Природные комплексы суши.....	40
Глава 5. Морские воды .....	49
Глава 6. Экологическая ситуация .....	72
Часть 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ	80
Глава 7. Ограничения на стандартные модели .....	80
Глава 8. Моделирование логистических операций .....	90
Глава 9. Задача коммивояжёра .....	109
Глава 10. Экспертно-аналитические системы.....	122
Часть 4. ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУК- ТУРЫ В АЗРФ .....	132
Глава 11. Оптимизация морских перевозок.....	132
Глава 12. Возможности оптимизации погрузочно-разгру- зочных операций.....	161
Глава 13. Размещение морских нефтяных терминалов .....	183
Глава 14. Моделирование размещения трасс трубопрово- дов в прибрежной зоне.....	208
Заключение.....	227
Список литературы .....	230

## Введение

Русский Север стал осваиваться ещё в IX веке [Булатов, 1997] выходцами из новгородских земель. Объектами их предпринимательской деятельности были рыба, морской зверь, ягоды и грибы, пушнина и соль, которую выпаривали из морской воды. Позже к ним добавились заготовка древесины и, уже в наше время, разработка месторождений угля, цветных металлов и углеводородов, в том числе и на континентальном шельфе Северного Ледовитого океана.

Постепенно создавалась и соответствующая инфраструктура, обеспечивающая все виды хозяйственной деятельности, а также защиту территорий и акваторий, принадлежащих царской России (империи) – Советскому Союзу – Российской Федерации.

Основными объектами инфраструктуры на Севере стали – и являются до сих пор – порты и портопункты. И это не удивительно, поскольку только морской и речной транспорт в состоянии обеспечивать нужды всех хозяйствующих субъектов и силовых ведомств на таких огромных территориях и в таких суровых природных условиях.

Правда, в XX веке водному транспорту появилась, как казалось, серьёзная альтернатива в виде авиации. Однако по своей грузоподъёмности и, главное, автономности самолёты существенно уступают судам, да к тому же в значительно большей степени зависят от погоды. Для их эксплуатации требуется строительство взлётно-посадочных полос и сопутствующей инфраструктуры. Это стало основными причинами преобладания морских перевозок в северных регионах перед всеми остальными видами, хотя тот же авиационный транспорт занял в них своё достойное место. Такое положение сохранится и в обозримом будущем [Тутыгин, 2016].

Следовательно, для поддержания и развития таких огромных территорий, как Арктическая зона Российской Федерации, по которой протекает множество крупных рек и которая имеет выход к

морям, необходимо совершенствование всей транспортной инфраструктуры, и водной – в первую очередь.

Арктическая зона Российской Федерации (АЗРФ) определена Указом Президента РФ № 296 от 02.05.2014 года «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации». В её состав входят территории девяти субъектов РФ, а также морские острова согласно Постановлению Президиума ЦИК СССР от 15 апреля 1926 г. Данным постановлением территорией СССР были объявлены все земли и острова, расположенные в Северном Ледовитом океане к северу от побережья СССР до Северного полюса в пределах между меридианами  $32^{\circ} 4'35''$  в. д. (а в пределах от  $74^{\circ}$  до  $81^{\circ}$  с.ш. – по меридиану  $35^{\circ}$  в.д.) и  $168^{\circ}49'30''$  з. д. Исключение составляют земли и острова архипелага Шпицберген.

В состав арктической зоны России включаются такие архипелаги, как Земля Франца-Иосифа, Северная Земля, группа островов Новая Земля и другие острова, расположенные в Северном Ледовитом океане, в границах, которые определены следующим образом: на западе и востоке – в пределах государственной границы Российской Федерации, на севере – в соответствии с нормами международного права. С учётом дополнений к этому Указу – Указам Президента Российской Федерации от 27.06.2017 г. № 287 и от 13.05.2019 г. № 220 – территория АЗРФ стала равна примерно четверти площади России.

Развитие объектов транспортной инфраструктуры требует больших капитальных вложений. Но это не главная проблема в структуре доставки грузов в данный регион и вывоза из него продукции добывающих предприятий. В списке первоочередных задач стоят эффективное управление перевозками, которые сейчас раздроблены среди ведомств и частными компаниями, и уменьшение риска аварий, особенно при перевозке наливных грузов и транспортировке по трубопроводам.

Последнее обстоятельство играет важную роль в экономике и экологии: ликвидация последствий аварий танкеров и на нефтепроводах требует таких расходов, что может превзойти всю прибыль предприятия от этого вида деятельности [Воробьёв, Акимов, Соколов, 2012]. Учитывая огромный общественный резонанс от таких аварий, мгновенно распространяющихся в СМИ и посредством электронных коммуникаций, потери для владельцев и рядовых акционеров от потери позитивного имиджа компаний могут

быть в разы больше, чем непосредственно от ущерба окружающей среде. К таким же последствиям может привести и авария обычного сухогруза, повредившего корпус при посадке на мель или раздавленного ледяными массивами, при которой большие количества топлива выльются в море.

Наряду с решением организационных и управленческих проблем значительным резервом для повышения эффективности и безопасности перевозок в АЗРФ является оптимизация транспортных потоков. Оптимизация понимается нами в широком смысле слова: доставка груза за минимальное время и осуществление выгрузки/загрузки в самые короткие сроки. Расчёты, выполненные нами по упрощённым моделям, показали, что экономия за счёт оптимизации по времени может достигать 15-20% времени рейса. А это не так уж мало, особенно в осенний период.

Полученные результаты показали перспективность модельных исследований логистических операций. Но при этом выяснилось, что стандартные модели, достаточно хорошо зарекомендовавшие себя в других бассейнах, здесь, в силу целого ряда причин, не могут быть использованы в изначальном виде. Поэтому необходимо разработать методологию моделирования, позволяющую имитировать весь процесс логистических операций. Нами предложен и реализован для некоторых типов операций подход, сочетающий в себе известные модели и экспертные технологии, идеология которого изложена в настоящей монографии.

Монография состоит из четырёх частей. В первой части рассмотрена вся транспортная инфраструктура АЗРФ с позиций её соответствия целям и задачам развития макрорегиона и обеспечения текущих потребностей. Во второй части описаны особенности природных условий и экологической ситуации и их влияние на функционирование водного транспорта, проектирование и строительство объектов транспортной инфраструктуры. В третьей части изложены методологические подходы к моделированию логистических операций и проанализированы ограничения на стандартные модели при реализации их в условиях северных и арктических территорий и акваторий. В четвёртой части даны примеры применения некоторых из описанных моделей и методологий для морского и трубопроводного транспорта, результаты которых имеют практическую значимость.

## Часть 1 ТРАНСПОРТНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА АЗРФ

### Глава 1 АЗРФ как транспортный коридор

Акватория Северного Ледовитого океана и его морей является естественным транспортным коридором на Севере России. Основу его составляет Северный морской путь (СМП), проходящий вдоль берегов Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского и Берингова морей от пролива Карские Ворота и мыса Желания на северной оконечности архипелага Новая Земля до бухты Провидения в Беринговом море [ФЗ от 28.07.2012 № 132]. Его протяжённость – 5600 км. СМП соединяет европейские и дальневосточные российские порты, а также устья судоходных сибирских рек в единую общероссийскую транспортную систему.

Этим законом в Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации была введена новая статья 5.1 «Плавание в акватории Северного морского пути», часть 1 которой гласит: «Под акваторией Северного морского пути понимается водное пространство, прилегающее к северному побережью Российской Федерации, охватывающее внутренние морские воды, территориальное море, прилежащую зону и исключительную экономическую зону Российской Федерации и ограниченное с востока линией разграничения морских пространств с Соединенными Штатами Америки и параллелью мыса Дежнева в Беринговом проливе, с запада меридианом мыса Желания до архипелага Новая Земля, восточной береговой линией архипелага Новая Земля и западными границами проливов Маточкин Шар, Карские Ворота, Югорский Шар» (рис. 1.1) [<http://www.morvesti.ru/tems/detail.php?ID=62459>].

В 1998 году вся арктическая трасса, включая СМП, получила статус самостоятельного Евро-азиатского арктического транспортного коридора (ЕААТК). ЕААТК является кратчайшим ко-

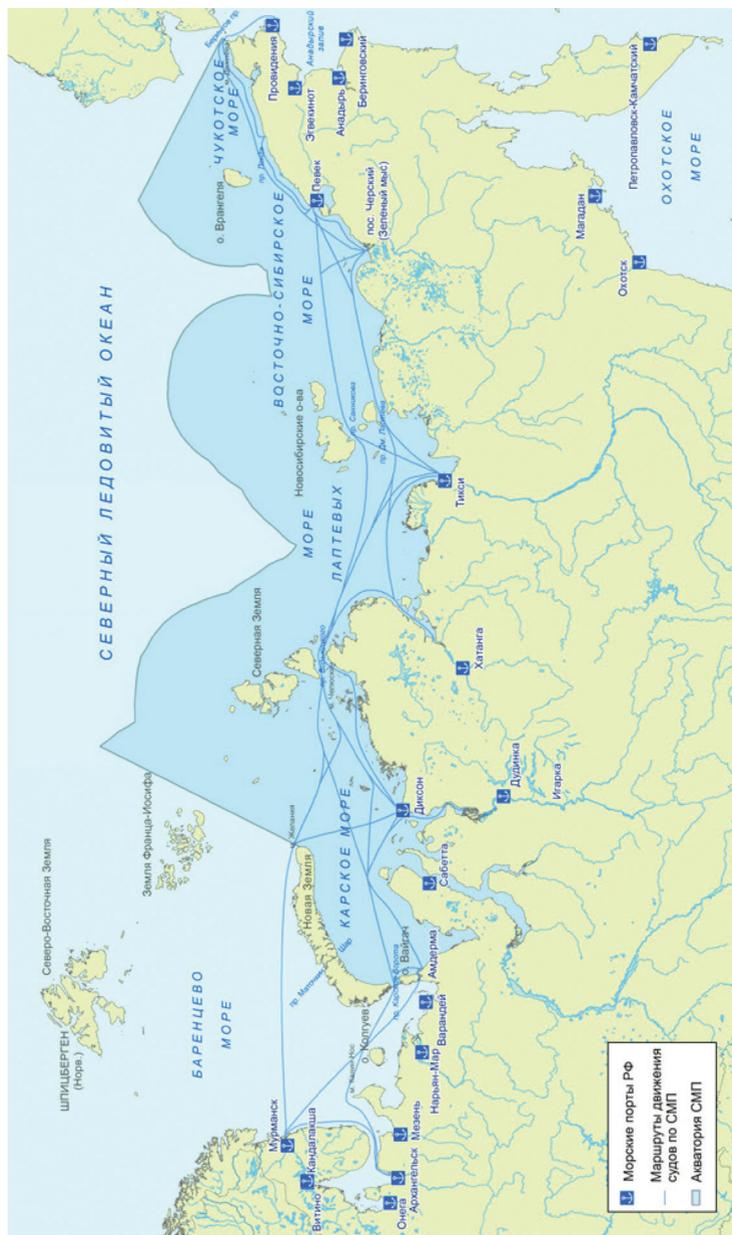


Рис. 1.1. Акватория Северного морского пути

ридором между северной частью Европы и северной частью Азиатско-Тихоокеанского региона, а также северо-западным побережьем США и Канады. Это серьёзная альтернатива транспортным коридорам, проходящим через Суэцкий и Панамский каналы, и рассматривается мировым сообществом как резерв глобальной международной транспортной системы.

Сегодня СМП рассматривается, да по сути и является таковым, как неотъемлемая часть Северного транспортного коридора, который, в свою очередь, входит в систему *транспортных евро-азиатских коридоров* (СТЕК) [Собянин, Боровиков, Плюснин, 2005. [http://conjuncture.ru/sobianin\\_26-04-2005/](http://conjuncture.ru/sobianin_26-04-2005/)]. Северный транспортный коридор соединяет порты Ботнического залива Балтийского моря, прежде всего Оулу в Финляндии, с Архангельском и Пермью. В Оулу он соединяется с Североевропейским Транспортным Кольцом, а по суше, между посёлками Кочкомой и Сумским в Карелии, он пересекается с транспортной магистралью Мурманск – Петрозаводск – Санкт-Петербург, являющейся уже частью меридионального Южного Транспортного Коридора. Через Архангельск он выходит на СМП, а в Усть-Ваге – населённом пункте, расположенном в месте впадения Ваги в Северную Двину, – пересекает трассу Москва – Ярославль – Вологда – Архангельск. В Перми соединяется с одной из боковых ответвлений Транссиба.

Северный транспортный коридор – это кратчайшая транспортная артерия, соединяющая Атлантические и Тихоокеанские рынки (можно говорить: Североевропейское и Дальневосточное Кольца). При этом происходит заметное сокращение расстояний. Так, доставка грузов до Йокагамы морским путём из Мурманска уменьшает трассу на 56% по сравнению с транспортировкой через Суэцкий канал, из Роттердама – на 34%. Путь до Шанхая из этих портов короче, соответственно, на 46% и 23%, до Ванкувера – на 44% и 22%, соответственно (табл. 1.1).

Таблица 1.1

#### Сокращение расстояний при использовании Севморпути

Порт назначения	Мурманск		Роттердам	
	через Суэцкий канал, км	через СМП, км	через Суэцкий канал, км	через СМП, км
Йокагама	12 840	5 767	11 205	7 345
Шанхай	11 999	6 501	10 521	8 079
Ванкувер	9 710	5 406	8 917	6 985

## Глава 2

### Портовая инфраструктура

Несмотря на огромную площадь акватории, входящую и примыкающую к АЗРФ, в ней находится всего 16 портов (рис. 2.1). Это не должно вызывать удивления, поскольку территория АЗРФ слабо заселена и на ней мало промышленных предприятий. Такая же ситуация по тем же причинам наблюдается и в других странах бассейна Северного Ледовитого океана – США, Канаде, Норвегии.

В качестве первого шага проведем, основываясь на данных аналитического сервиса ПОРТСТАТ Грузы, анализ грузооборота портов в Арктическом бассейне. Стоит учесть, что данные актуальны на ноябрь 2018 года, то есть конец навигационного периода в большинстве портов.

Грузооборот Арктического бассейна составляет лишь 10,58% от общего числа по Российской Федерации и находится на 4-ом месте, опережая только Каспийский бассейн – 0,59% в общей структуре грузооборота (рис. 2.3). В натуральном выражении грузооборот составляет 71 200,4 тысяч тонн против общероссийского показателя 672 916,7 тысяч тонн.

Доли по направлениям (рис. 2.4) свидетельствуют о том, что Арктический бассейн в первую очередь ориентирован на экспортные перевозки – 64,1% (45 636,8 тысяч тонн). Следом идут каботажные перевозки – 35,4% (25 204 тысяч тонн). Такой показатель удерживается за счет порта Мурманск, через который идет большая часть грузов для государственных структур в Арктике и в порт Саббета. Низкие показатели по импорту (0,5%) и транзиту (0,01%) в данной области свидетельствуют о непривлекательности региона для иностранных маршрутов ввиду отсутствия экономической целесообразности и необходимой инфраструктуры для транзитных перевозок соответственно.

В номенклатуре перевозимого груза, порядка 49,76% (35 429,4 тысяч тонн), в структуре грузооборота Арктического бассейна (рис. 2.5) занимает нефть. Далее идет уголь и кокс – 22,87% (16 286,7 тысяч тонн), прочие грузы, к которым в данном случае относятся: навалочные, лесные, грузы в контейнерах, генеральные и наливные – 9,02% (7 893,6 тысяч тонн), сжиженный газ – 8,55%

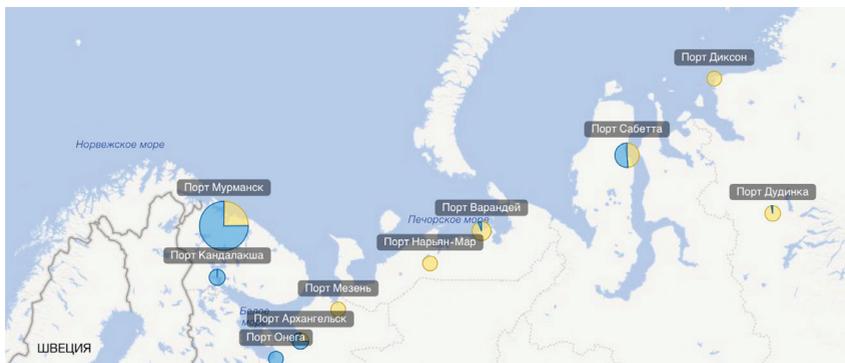


Рис. 2.1. Расположение портов Арктического бассейна в западном секторе Арктической зоны Российской Федерации [https://seanews.ru/2017/11/18/portstat-gruzu-analiticheskij-servi/]

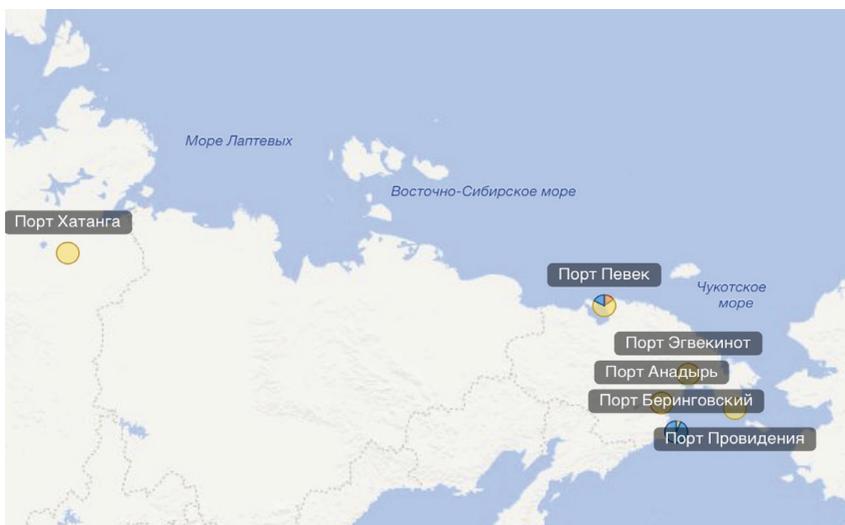


Рис. 2.2. Расположение портов Арктического бассейна в восточном секторе Арктической зоны Российской Федерации [https://seanews.ru/2017/11/18/portstat-gruzu-analiticheskij-servi/]

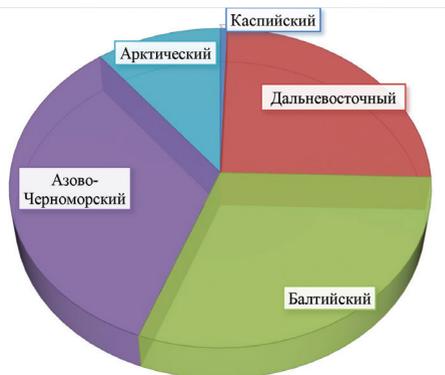


Рис. 2.3. Доли бассейнов российских портов в общей структуре грузооборота, %

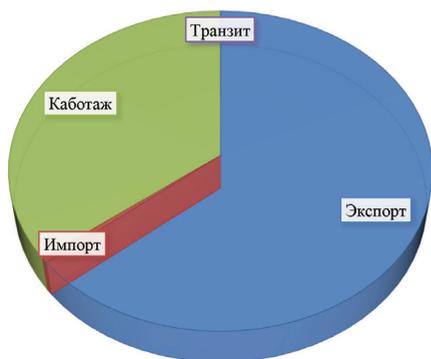


Рис. 2.4. Доли по направлениям грузооборота Арктического бассейна Российской Федерации, %

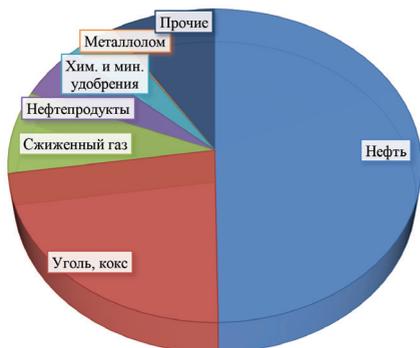


Рис. 2.5. Доли номенклатуры в структуре грузооборота Арктического бассейна Российской Федерации, %

(6 088,4 тысяч тонн), нефтепродукты – 5,41% (3 851 тысяч тонн), химические и минеральные удобрения – 4,19% (2 983 тысячи тонн) и металлолом 0,2% (145 тысяч тонн).

В сравнительном анализе аналогичного периода 2017 года, грузооборот в котором составил 60 871 тысяч тонн, в целом наблюдается положительная динамика по трем пунктам: экспорт увеличился на 23,9% (+8 818,9 тысяч тонн), каботаж – на 12,2% (+2740,7 тысяч тонн), транзитные перевозки составили 4 500 тонн по сравнению с нулевым значением предыдущего года. В то же время показатель импортных перевозок снизился на 39,8% (-234,7 тысяч тонн), однако на динамике роста грузооборота в Арктическом бассейне сказался незначительно, как и рост транзита, так как основной объем перевозок через порты приходился на каботаж и экспорт (рис. 2.6).

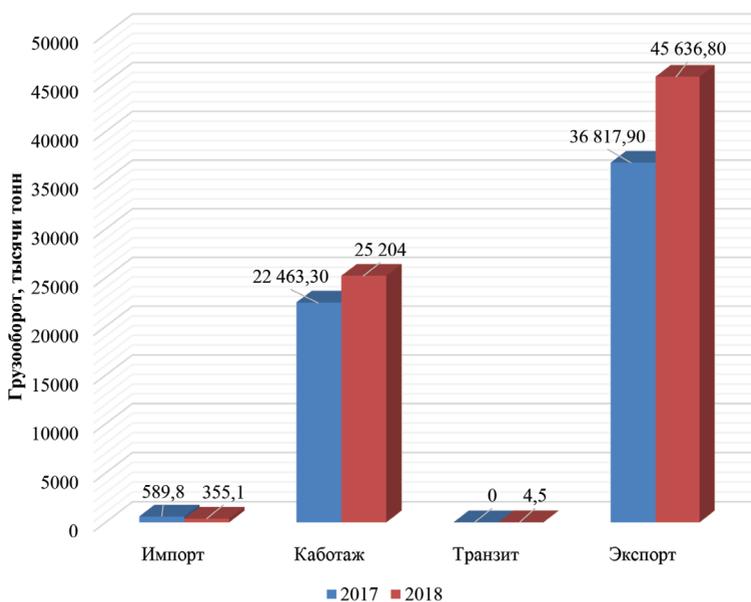


Рис. 2.6. Грузооборот Арктического бассейна 2017 и 2018 гг. по направлениям

По состоянию на 1 ноября 2018 года распределение грузооборота по портам Арктического бассейна представляется неравномерным. Основная доля грузооборота в Арктическом бассейне приходится на порт Мурманск – 64,77% или 46 117,2 тысяч тонн в натуральном выражении с основной номенклатурой переваливаемого груза нефть. За ним идут порты Сабетта с долей 18,13% или 12 909,8 тысяч тонн и основной номенклатурой сжиженный газ, порт Варандей с долей 8,10% или 5769,7 тысяч тонн, основной номенклатурой нефть и порт Архангельск с долей 3,35% или 2 383,3 тысяч тонн, основной номенклатурой нефтепродукты. Завершают список порты Провидения, Хатанга, Диксон и Мезень с долей каждого 0,02% и совокупным объемом грузооборота 66 тысяч тонн (табл. 2.1).

Таблица 2.1

**Количественная и процентная доля грузооборота  
по портам Арктического бассейна**

Порт	Грузооборот, тысячи тонн	Доля в общем грузообороте, %	Основная номенклатура
Мурманск	46117,2	64,77	Нефть
Сабетта	12909,8	18,13	Сжиженный газ
Варандей	5769,7	8,10	Нефть
Архангельск	2383,3	3,35	Нефтепродукты
Кандалакша	1759,7	2,47	Уголь, кокс
Дудинка	1067,7	1,50	Грузы в контейнерах
Беринговский	375,7	0,53	Уголь, кокс
Певек	276,3	0,39	Прочие генеральные
Анадырь	209,6	0,29	Уголь, кокс
Эгвекинот	100,7	0,14	Уголь, кокс
Нарьян-Мар	99,8	0,14	Прочие навалочные
Онега	64,9	0,09	Лесные
Провидения	17,6	0,02	Уголь, кокс
Хатанга	16,7	0,02	Нефтепродукты
Диксон	16,6	0,02	Уголь, кокс
Мезень	15,1	0,02	Уголь, кокс

Из представленных выше статистических данных можно сделать следующие выводы о грузообороте и самом Арктическом бассейне:

1) Арктический бассейн ориентирован на ресурсную экономику, определенные виды груза (наливные грузы, например, нефть, сжиженный газ, нефтепродукты);

2) портовая инфраструктура Арктического бассейна ориентирована на переработку наливных номенклатур груза;

3) использование преимущественно каботажных перевозок за счет отсутствия круглогодичных подъездных автомобильных и железнодорожных путей, за исключением портов Мурманска, Кандакши, Онеги и Архангельска ввиду их географического положения;

4) неоднородность дислокации портов по высокоширотной морской магистрали и, как следствие, условное деление российской Арктики на западный (от Кольского полуострова до архипелага Новосибирские острова) (рис. 2.1–2.2) и восточный сектор (от архипелага Новосибирские острова до южной оконечности Анадырского залива);

5) дисбаланс в долях направлений перевозок, приводящий к низкой эффективности стратегии транспортного развития региона, а именно однополярная ориентированность перевозок и номенклатур.

В последние годы активно развивается Арктическая транспортно-технологическая схема (ТТС) в направлении перевозки нефти и газа. Началом её является строительство нефтеналивных терминалов в портах Сабетта и Варандей, в 2013 г. и 2008 г. соответственно. Важно отметить, что порты Сабетта и Варандей наряду с Мурманском являются лидерами по грузообороту нефти как в каботаже, так и в экспорте в период с 2015 по 2018 гг., при этом порт Мурманск аккумулирует нефть с каботажа для ее дальнейшего экспорта танкерами или железнодорожным и автомобильным транспортом только для перевозок внутри страны (таб. 2.2).

Учитывая перспективы добычи нефтяных углеводородов в Арктике, можно уверенно прогнозировать не только значительное увеличение роста транспортировки нефтяных углеводородов морским путём, но и строительство новых специализированных портов и терминалов в регионе. Изыскательские и проектные работы для строительства новых портов уже ведутся.

Таблица 2.2

**Грузооборот нефтяных углеводородов Арктической зоны  
Российской Федерации**

Порт	Среднее значение за период 2015-2018 гг.			
	Грузооборот, тыс. тонн	Доля, %	Прирост, тыс. тонн	Прирост, %
Мурманск	9222,58	39,08	5836,07	157,66
Варандей	5009,95	19,33	2222,30	21,51
Сабетга	4541,75	16,03	2792,77	82,35

Особую роль во всём Арктическом регионе играет порт Архангельск, несмотря на его относительно небольшой вес в объёме перевозок. Для нас он представляет интерес как базовый порт Северного завоза, поэтому его изучению будет уделено особое внимание. Архангельск являлся и является отправной точкой большинства рейсов. К тому же порт Архангельск сталкивается с рядом проблем, характерных и для других северных и арктических портов региона, рассмотрение которых поможет лучше понять общие проблемы в целом.

Немного истории. Архангельский порт является одним из старейших портов в России и первым морским портом, соединившим торговый путь из внутренних регионов России в Западную Европу после посещения города Петром I в девяностых годах XVII века. Однако, начиная с 1713 года, царь Петр I своими указами начал вести дискриминационную политику в отношении торговли через Архангельск, фактически жертвуя его интересами в пользу нового балтийского порта Санкт-Петербурга. В Архангельск он разрешил ввозить только такое количество товаров, которое было необходимо «для прокорма населения» [Беспятых, 2010].

Бурное развитие Архангельский морской торговый порт получил после Октябрьской революции 1917 года. Ключевую роль в этом сыграли постановления и декреты, подписанные главой правительства В.И. Лениным: об ассигнованиях по обеспечению «безопасности судоходства по Северному Ледовитому океану и его морям» – постановление СНК от 29 июля 1920 г. – 41,3 млн рублей (!), «Об охране рыбных и звериных угодий в Северном Ледовитом океане и Белом море» от 24 мая 1921 г.,

«Об открытии Архангельского порта» от 11 апреля 1921 г., о создании треста «Северолес» от 17 августа 1921 г. и другие. Ключевую роль здесь сыграла жизненная для страны потребность в твёрдой валюте, поступления которой в тот период обеспечивал экспорт леса. Архангельская область, а затем и созданный Северный край были основными поставщиками этой продукции.

В годы Второй мировой войны в порт Архангельск приходили грузы по соглашению «Ленд-лиз» от 11 марта 1941 года, также известные как «Северные конвои». Соглашение подразумевало под собой передачу со стороны США займы или в аренду вооружения, боеприпасов, транспортных средств, промышленного оборудования, нефтепродуктов, сырья, продовольствия, информации и услуг, необходимых для ведения войны, странам – союзницам по антигитлеровской коалиции 1941–1945 годов. Первый конвой «Дервиш» из Великобритании в порт города Архангельска прибыл 31 августа 1941 года. Последний – 28 января 1944 года из Ливерпуля. Все последующие конвои были направлены в Кольский залив и порт города Мурманска [Бутенина, 2004].

За период 1960–1990 гг. грузооборот вырос с 2,8 до 5,4 млн т., чему благоприятствовал переход на круглогодичную работу в 1978 году и преобразование Архангельского морского торгового порта в крупнейший специализированный лесной порт СССР.

До 1990-х годов порт оснащался современными судами различных типов: лесовозами, теплоходами, мощными ледоколами, буксирами и землесосами. Строились новые железно- и автодорожные подъездные пути, новые причалы и складские помещения, проводилась комплексная механизация погрузочно-разгрузочных работ, внедрялись прогрессивные способы переработки грузов, на судоходных каналах велись дноуглубительные работы.

В период с 1990-х до середины первого десятилетия XXI века – переходная фаза для российской экономики – Архангельский морской торговый порт переживал не лучшие времена, впрочем, как и все морские порты страны. Среди множества причин этого можно выделить три основных:

- 1) приватизация отдельных, наиболее значимых объектов инфраструктуры, таких как: складские помещения вблизи причальных стенок; подъездные железнодорожные и автомобильные пути; грузовая техника (краны причальные и складские, контейнерные

перегрузатели, автоконтейнеровозы и другие); вспомогательный флот и прочее [Российская экономика в 2002 году, 2003];

2) узкая специализация самого порта на вывозе продукции деревообрабатывающей промышленности. Из-за спада производства в отрасли большинство мощностей остались не востребованы, что повлекло за собой расформирование лесовозных флотилий или перевод их в другие регионы, а обработка генеральных грузов, контейнеров и наливных грузов в совокупности составляла менее 30% от общего объема;

3) снижение интереса государства к Арктическому региону как к объекту целостной транспортно-логистической схемы снабжения Арктики, в том числе и оборонного комплекса.

Изменить ситуацию можно было только после направления грузопотоков из внутренних регионов России в Архангельск. После принятия «Стратегии социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации» в 2017 году [Постановление Правительства РФ от 21.04.2014 № 366 (ред. от 31.08.2017) «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации» // Консультант плюс URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_72390/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_72390/) (дата обращения: 03.12.2018)], «Стратегии развития морской портовой инфраструктуры до 2030 года» в 2012 году [«Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года» (одобрена Морской коллегией при Правительстве РФ 28.09.2012) // Консультант плюс URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_72390/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_72390/) (дата обращения: 03.12.2018)] новый виток развития получил проект «Белкомур» (рис. 2.7).

Проект задумывался еще в 1912 году, однако первый этап реализации пришелся только на 1947–1954 годы строительством участков Архангельск – Карпогоры и Вендига – Микунь протяженностью более 400 километров железнодорожных путей. Наиболее известная аббревиатура «Белкомур», состоящая из первых букв участков прохождения маршрута (Белое море – Коми – Урал), присвоена в 1995 году в связи с началом строительства участков Карпогоры – Шадра (22 км) и Ертом – Вендига (18 км) [О проекте «Белкомур» // Белкомур URL: <http://www.belkomur.com> (дата обращения: 03.12.2018)]. В 2011 году проект включен в Стратегию

развития Северо-Западного Федерального округа. В том же году бюджетирование проекта вывели из-под федерального обеспечения и разработали концепцию реализации проекта по принципам государственно-частного партнерства. В 2015 г. между МК «Белкомур» и китайской компанией «Poly Technologies» подписано соглашение о совместных намерениях по реализации проекта в рамках частной концессионной инициативы. В ценах 2016 г. стоимость проекта оценивалась в 5,5 млрд долл.

В 2018 г. был принят концептуальный документ [Распоряжение Правительства от 30 сентября 2018 года № 2101-р «Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года»], направленный на развитие магистральной инфраструктуры.

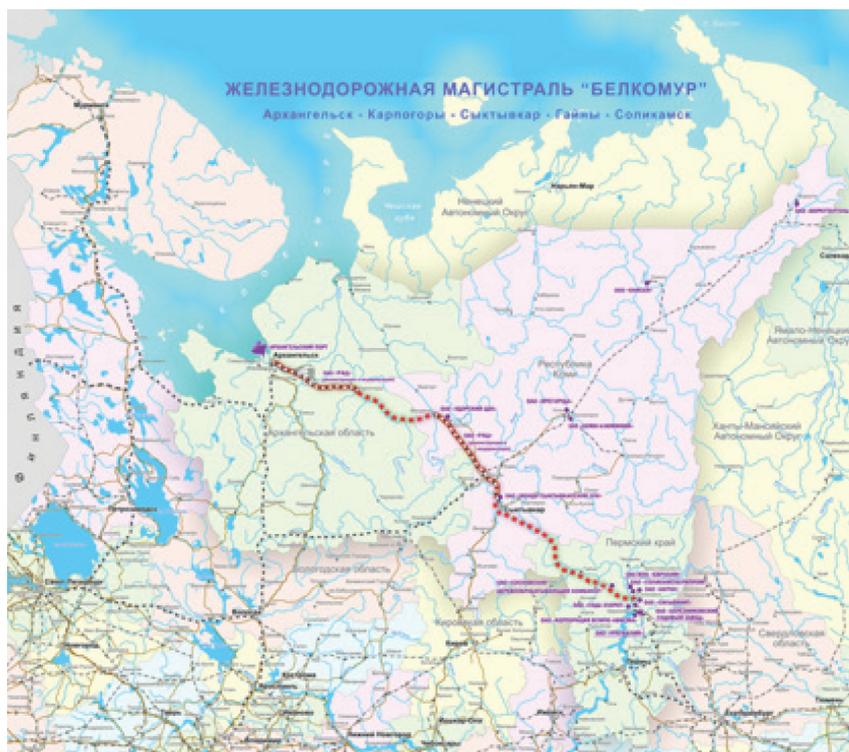


Рис. 2.7. Маршрут железнодорожной магистрали «Белкомур»



- 3) физический износ портового оборудования;
- 4) недостаточная развитость подъездных железнодорожных путей с восточного направления.

Поскольку импорт и транзит по-прежнему занимает незначительное место в структуре перевозок порта, для успешного функционирования порта необходимо сместить акцент в пользу каботажного направления перевозок ввиду его социально-экономического и стратегического значения, а также провести исследование дотационной природы финансирования, поскольку экспортное направление перевозок способно обеспечить себя самостоятельно за счет средств предприятий.

Каботаж в современных реалиях Арктической зоны Российской Федерации представляется самым эффективным способом снабжения территорий. Обусловлено это тем фактом, что исторически освоение данного региона происходило водными путями, и, соответственно, инфраструктура формировалась с акцентом на морское снабжение. Однако присущая политике СССР целостность транспортной и экономической систем сменилась дискретностью и очаговым принципом развития отдельно взятых территорий. Стоит отметить тот факт, что данная проблема присуща не только каботажному направлению перевозок, но и экспорту, импорту и транзиту в Арктическом бассейне в целом.

Этот вопрос также рассматривается не только на уровне предприятий подотрасли морского транспорта, но и на уровне федерального правительства. Об этом свидетельствует документ с рекомендациями по результату заседания Комитета Совета Федерации по федеральному устройству, региональной политике, местному самоуправлению и делам Севера (протокол № 189 от 29 января 2019 г.) «Вопросы обеспечения поставок продукции (товаров) в районы Крайнего Севера и приравненные к ним местности с ограниченным сроком завоза грузов», в пункте 1.1 которого, обращенному к Правительству Российской Федерации, помимо прочих, вынесено положение, в котором говорится о необходимости разработки проекта федерального закона о досрочном завозе продукции (товаров) в районы Крайнего Севера и приравненные к ним местности. В нём будет указан порядок создания и управления единой специализированной информационной системой планирования и мониторинга Северного завоза, который обеспечит возможность

определения потребностей в поставках продукции, обеспечит учет запасов продукции на местах, позволит повысить эффективность использования транспортных средств и пунктов хранения. В том же пункте 1.1 вынесена рекомендация об определении понятия «Северный завоз». В пункте 2.2, обращенном к Министерству транспорта Российской Федерации, вынесена рекомендация по принятию необходимых мер по модернизации инфраструктуры Северного морского пути и ускорению сроков строительства новых ледоколов, судов-транспортников ледового класса различного назначения, в том числе контейнеровозов.

Основным инструментом развития Арктической зоны Российской Федерации в разрезе каботажного судостроения является ресурсодобывающая отрасль, которая составляет доминирующую долю в грузообороте. При этом необходимо обратить внимание на двойственность количественного измерения объема номенклатур, производимых отраслью: несмотря на учет данных видов груза как каботажных, по факту подавляющее большинство из них является объектами экспорта. Поэтому рассмотрение некоторых наливных номенклатур, таких как нефть, уголь, кокс и газ, с точки зрения позитивного влияния на грузооборот и снабжения территорий представляется некорректным. Поэтому наиболее достоверную картину отображают остальные номенклатуры грузов, которые, несмотря на рост в натуральном измерении, показывают снижение доли в общей структуре грузооборота. Среди причин, влияющих на это, можно выделить:

- 1) непривлекательность морского вида транспорта в качестве инструмента снабжения;
- 2) недостаточное финансирование снабжения социально значимых объектов;
- 3) отток населения из большинства населенных пунктов;
- 4) искусственное замедление темпа роста экономики;
- 5) чувствительность рынка морских перевозок к изменениям экономики;
- 6) сворачивание стратегически важных объектов.

Главным инструментом в развитии каботажных перевозок может стать систематизация и оптимизация Северного завоза, без которого задачи, поставленные в документе «Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности до 2020 г.», представляются труднодостижимыми.

На текущий момент Северный завоз осуществляется весьма хаотичным образом – бюджет на него распределяется по остаточному принципу и не является приоритетным. Со второго десятилетия XX в. основное внимание было направлено на развитие портовой инфраструктуры месторождений полезных ископаемых и отложен вопрос о восстановлении портов и портовой инфраструктуры, не подходящей по данным критериям. Несмотря на субсидирование социальных объектов, в рамках этих проектов проводится модернизация, но не реновация оборудования. Причиной этому служат трудности, возникающие при аудите портового инфраструктурного комплекса, капитальный ремонт которого не проводился с 70-х годов прошлого столетия. Поэтому реальное положение дел, как показывает практика, знают только органы местного самоуправления и компании, занимающиеся доставкой грузов. Помимо этого, выделяется ряд причин, усложняющих объективную оценку стоимости доставки грузов в Арктическом бассейне, которые будут подробно рассмотрены нами далее.

### Глава 3

## **Авиационный, железнодорожный, автомобильный и трубопроводный транспорт**

Для более полного понимания ситуации приведём сведения о других видах транспорта и основных объектах транспортной инфраструктуры в АЗРФ. Они необходимы не только для планирования и осуществления различных типов логистических операций, но и для успешной разработки математических моделей этих операций.

### *Трубопроводный транспорт в АЗРФ.*

Территория России практически вся пронизана различными трубопроводами, в частности магистральными и межпромысловыми. В общей структуре российских грузовых перевозок доля трубопроводного транспорта составляет порядка 50 %.

Трубопроводы и отводы от них с диаметром до 1420 мм, которые выдерживают избыточное давление среды свыше 1,2 МПа (12кгс/см<sup>2</sup>) до 12 МПа (100кгс/см<sup>2</sup>), предназначенные для транс-

портировки углеводородов от места производства к месту потребления, называются магистральными.

Трубопроводы, расположенные севернее 60-й параллели и относящиеся к Арктической зоне страны, называют арктическими. Основными факторами, характеризующими особенности арктических трубопроводов, являются климатические и грунтовые условия в районах их прокладки.

Открытые месторождения нефти и газа на северных территориях, в Арктике и на континентальном шельфе Северного Ледовитого океана определяют огромные перспективы строительства арктических и приарктических трубопроводов. Они обуславливают необходимость поиска современных решений в области как конструирования трубопроводов, так и методов их монтажа.

Самыми крупными трубопроводами на территории АЗРФ являются следующие.

#### *Газопроводы.*

Трубопровод, транспортирующий газ с месторождения Бованенковское, которое находится в АЗРФ, называется Бованенково-Ухта и Ухта-Торжок. Часть трубопровода Бованенково-Ухта находится в АЗРФ (рис. 3.1).

В 2002 году Правление ОАО «Газпром» определило полуостров Ямал регионом стратегических интересов компании. Промышленное освоение месторождений Ямала позволит довести добычу газа на полуострове до 250 млрд м<sup>3</sup> в год. Выход на Ямал имеет принципиальное значение для обеспечения роста добычи газа.

Первоочередным объектом освоения на Ямале являются сеноман-аптские залежи Бованенковского месторождения.

Для транспортировки газа Бованенковского месторождения с проектным уровнем добычи 115 млрд м<sup>3</sup> в год, а в долгосрочной перспективе с учетом освоения неоком-юрских залежей месторождения – 140 млрд м<sup>3</sup> в год планируется сооружение многониточной газотранспортной системы, связывающей полуостров Ямал и центральные районы России.

Из-за суровых арктических холодов при строительстве используются трубы диаметром 1420 мм, рассчитанные на повышенное рабочее давление.



Рис. 3.1. Схемы магистральных газопроводов в Арктической зоне Российской Федерации Бованенково-Ухта, Ухта-Торжок, СРТО-Торжок

Протяженность трассы составит свыше 2400 км, включая новый газотранспортный коридор «Бованенково-Ухта» протяженностью около 1100 км (проектная производительность – 140 млрд м<sup>3</sup> газа в год).

С 2007 года на территории Республики Коми ведутся работы по строительству объектов системы магистральных газопроводов «Бованенково-Ухта». В августе 2008 года «Газпром» приступил к строительству наиболее сложного участка системы магистральных газопроводов «Бованенково-Ухта» – подводного перехода через Байдарацкую губу Карского моря. Сварочно-монтажные работы на линейной части первой нитки были завершены в мае 2012 года. Первая нитка протяженностью более 1240 км (с учетом резервных ниток подводных переходов) введена в эксплуатацию в октябре 2012 года. В настоящее время продолжается строительство второй нитки и восьми компрессорных станций.

Одним из самых больших по протяженности трубопроводов России является трубопровод «Северные районы Тюменской области – Торжок». Небольшая часть трубопровода, находящаяся на севере Тюменской области, попадает в АЗРФ. А именно его часть «Уренгой-Надым-Перегибное» находится в условиях Крайнего Севера России. Основная цель реализации проекта – увеличение поставок газа потребителям Северо-Западного региона России, а также обеспечение экспортных поставок по газопроводу «Ямал-Европа». Трасса газопровода пролегает от Уренгойского месторождения в Западной Сибири до Торжка, где находится одна из узловых точек Единой системы газоснабжения России.

Протяженность газопровода – 2200 км. Количество компрессорных станций – 13 (общей мощностью 968 МВт). Проектная производительность – 20,5...28,5 млрд м<sup>3</sup> в год на различных участках. Строительство газопровода началось в 1995 году. Ввод в эксплуатацию линейной части газопровода завершен в 2006 году. На начало 2010 года было построено 10 компрессорных станций суммарной мощностью 743 МВт. В 2012 году введены еще три компрессорные станции, синхронизированные с вводом в эксплуатацию газопровода «Бованенково-Ухта». В 2012 году газопровод выведен на проектный режим работы.

Газопровод «Мурманск-Волхов» обеспечит поставки газа со Штокмановского месторождения для потребителей Северо-Запад-

ного региона России и экспортные поставки по газопроводу «Северный поток». Строительство газопровода, в частности, позволит реализовать социально значимую программу газификации Мурманской области и Карелии, что ускорит промышленное развитие региона.

Трубопровод находится на стадии проектирования. Планируется газопровод длиной около 1365 км. Планируемая производительность газопровода – до 50 млрд м<sup>3</sup> газа в год в зависимости от объемов добычи на Штокмановском месторождении. Предполагается строительство 10 компрессорных станций.

### *Нефтепроводы.*

Магистральным трубопроводом компании ОАО «АК «Транснефть», большая часть которого попадает в АЗРФ, является трубопровод «Заполярье-Пурпе-Самотлор» (рис. 3.2). Он предназначен для транспортировки нефти из районов Ямало-Ненецкого автономного округа и севера Красноярского края, в том числе Ванкорского месторождения, на нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ) России и на экспорт.

Первый этап (магистральный нефтепровод Пурпе-Самотлор мощностью 25 млн т нефти в год протяженностью 429 км (расширение 2 НПС, строительство 1 НПС) завершен строительством и введен в эксплуатацию в 2011 году.

Второй этап (магистральный нефтепровод Заполярье-Пурпе мощностью до 45 млн т в год протяженностью около 488 км, предполагает строительство 2 НПС, расширение 1 НПС) с выделением очередей:

- I очередь – участок от пос. Тарко-Сале до пос. Пурпе с завершением в 4 квартале 2014 года;
- II очередь – участок от пос. Новозаполярный до пос. Тарко-Сале с завершением в 4 квартале 2015 года;
- III очередь – участок от ГНПС «Заполярье» до пос. Новозаполярный с завершением в 4 квартале 2016 года.

Трасса проходит по территории Ямало-Ненецкого и Ханты-Мансийского автономных округов Тюменской области.

Арктический нефтепровод «Южное Хыльчую – Варандей» (рис. 3.3) компании ОАО НК «Лукойл» протяженностью 158 км проходит по Большеземельской тундре. Пропускная способность



Рис. 3.2. Схемы магистральных нефтепроводов в АЗРФ Заполярье-Пурпе-Самотлор

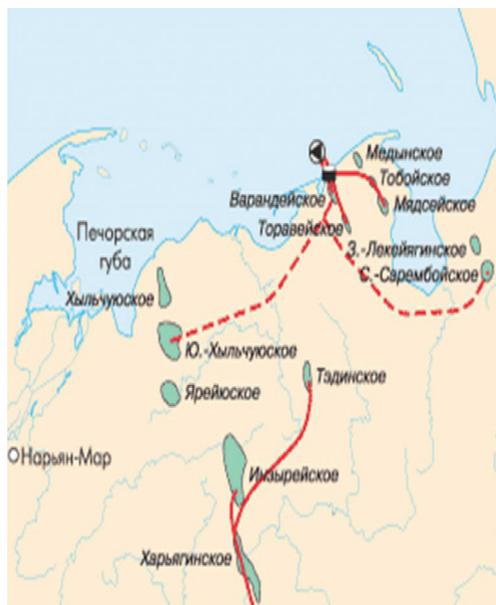


Рис. 3.3. Южное Хыльчую – Варандей

около 4 млн т/год нефти. Он предназначен для транспортировки нефти с месторождений северной части Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции на пункт сдачи-приема нефти «Южное Хыльчую» с последующей транспортировкой нефти по межпромысловому нефтепроводу «Южное Хыльчую-Варандей».

Нефтепровод условно можно разделить на 2 участка:

- 1) участок нефтепровода Харьяга – Инзырей протяженностью 48,6 км;
- 2) участок нефтепровода Инзырей – Южное Хыльчую протяженностью 114,8 км;

Диаметр трубы на участке нефтепровода Инзырей – Южное Хыльчую составляет 377 мм, а с учетом теплоизоляционной оболочки – около 1 метра. Диаметр трубы на участке нефтепровода Харьяга – Инзырей составляет 325 мм. Поток нефти с Инзырейского месторождения (около 300 тыс. т в год) тоже воляется в эту магистраль с мощностью 4 млн т в год.

*Железнодорожный транспорт в АЗРФ.*

Через территорию АЗРФ проходят пути шести российских железных дорог: Октябрьской, Северной, Свердловской, Красноярской, Восточно-Сибирской и Дальневосточной. При этом в двух субъектах РФ, входящих в АЗРФ, – Ненецком и Чукотском автономных округах – магистральное железнодорожное сообщение вообще отсутствует (табл. 3.1).

Таблица 3.1

**Железные дороги в Арктической зоне Российской Федерации**

Субъект Российской Федерации	Вхождение территорий в Арктическую зону Российской Федерации	Железная дорога
Мурманская область	Полностью	Октябрьская
Архангельская область	Онежский, Приморский, Мезенский районы, Архангельск, Северодвинск, Новодвинск, Новая Земля	Северная
Ненецкий автономный округ	Полностью	Нет ж/д
Республика Коми	Воркута	Северная
Ямало-Ненецкий автономный округ	Полностью	Свердловская
Красноярский край	Таймырский, Долгано-Ненецкий, Туруханский районы, Норильск	Красноярская
Республика Саха (Якутия)	Аллаиховский, Анабарский национальный (Долгано-Эвенкийский), Булунский, Усть-Янский улусы, Нижнеколымский район	Восточно-Сибирская, Дальневосточная
Чукотский автономный округ	Полностью	Нет ж/д

Октябрьская железная дорога проходит по территории 11 субъектов РФ – Ленинградской, Псковской, Новгородской, Вологодской, Мурманской, Тверской, Московской, Ярославской областей, городов Москва и Санкт-Петербург и Республики Карелия. Её общая

эксплуатационная длина составляет 10143 км. В АЗРФ Октябрьская ж/д проходит по территории Мурманской области. Её эксплуатационная длина здесь составляет 870 км, в том числе часть ж/д магистрали Санкт-Петербург – Мурманск (более 350 км), пересекающей область с юга на север, от границы с Карелией до Мурманска, а также ж/д линии Кола – Печенга, Оленегорск – Мончегорск, Апатиты – Титан, Пинозеро – Ковдор, Ручьи Карельские – Алакуртти, Мурманск – Ваенга, Луостари – Никель-Мурманский. Основные ж/д узлы и узловые станции: Мурманск, Апатиты, Ручьи Карельские, Кандалакша, Оленегорск, Пяйве, Заполярная.

Северная железная дорога (общая протяженность линий составляет 8500 км) берет начало в центре России и простирается далеко на север страны. Значительная её часть эксплуатируется в условиях Крайнего Севера и Заполярья. В АЗРФ магистрали Северной ж/д проходят через территории Архангельской области (1771 км), Республики Коми и Ямало-Ненецкого автономного округа. Основные ж/д узлы и станции на территории Архангельской области – Архангельск, Исакогорка (выход на Северодвинск), Вельск, Коноша, Котлас, Обозерская. Основные направления из Архангельска – на Москву, Санкт-Петербург, Ярославль, Республику Коми (Котлас – Воркута), а также в Республику Карелия и Мурманскую область (через ст. Обозерская).

Свердловская железная дорога (эксплуатационная длина – 7154 км, развернутая – 13853 км) соединяет европейскую и азиатскую части России, в том числе с запада на восток тянется на 1,5 тыс. км и в северном направлении пересекает Полярный круг. На территории АЗРФ магистраль проходит в Ямало-Ненецком автономном округе: в западной части ЯНАО линия Чум-Лабытнанги, в восточной – Ноябрьск – Новый Уренгой – Ямбург и Новый Уренгой – Пангоды – Надым. Общая протяженность ж/д путей в ЯНАО составляет 1648 км, крупные станции – Ноябрьск, Коротчаево, Пурпе, Новый Уренгой, Лабытнанги. В рамках программы по освоению месторождений полуострова Ямал была построена ж/д линия Обская – Бованенково. Эта железная дорога – самая северная в мире. Протяженность полотна до станции Карская составляет 572 км (до станции Бованенково – 525 км). Железная дорога включает 5 станций, 12 разъездов и 70 мостов общей длиной более 12 км.

Крупнейшим инфраструктурным проектом для формирования транспортного каркаса АЗРФ является «Северный широтный ход» (СШХ). Протяженность ж/д Обская – Салехард – Надым – Хорей – Пангоды – Новый Уренгой – Коротчаево – 707 км. Стоимость строительства в период 2018–2022 гг. (в том числе инфраструктуры) составляет 230 млрд. руб., из них 100 млрд. руб. – по концессионному соглашению (по данным ОАО РЖД). СШХ свяжет Северную и Свердловскую железные дороги, а ж/д Бованенково – Сабетта обеспечит выход к Севморпути.

Другим проектом, который в будущем должен соединить Северную и Свердловскую железные дороги, является строительство ж/д магистрали «Белкомур»: Архангельск – Сыктывкар – Соликамск (Пермь). Общая протяженность трассы составляет 1155 км, в том числе по территории Республики Коми – 459 км, Пермского края – 312 км, Архангельской области – 384 км. Из них новое строительство составляет 715 км (215 км на «Северном участке» и 500 км – на «Южном участке»), реконструкция на «Северном участке» – 440 км. «Белкомур» включен в «Стратегию развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» и «Транспортную стратегию Российской Федерации на период до 2030 года», Комплексную программу промышленного и инфраструктурного развития Республики Коми, Пермского края и Архангельской области. Железнодорожная магистраль составит единый комплекс с новым глубоководным районом Архангельского морского порта с общим годовым грузооборотом более 30 млн т, способным принимать суда дедвейтом до 70 тыс. т в районе губы Сухое море.

Красноярская железная дорога проходит через четыре крупных региона (Кемеровскую область, Республику Хакасия, Иркутскую область и Красноярский край), связывает Транссибирскую и Южносибирскую магистрали и является своеобразным мостом между европейской частью России, Дальним Востоком и Азией. Эксплуатационная длина Красноярской ж/д составляет 3160 км, общая протяженность – 4544 км.

Восточно-Сибирская железная дорога проходит по территории Иркутской и Читинской областей, республик Бурятия и Саха (Якутия). Протяженность этой магистрали составляет 3848 км. В АЗРФ она проходит по территории Якутии.

Дальневосточная железная дорога (эксплуатационная длина – 5986 км) проходит по территории пяти субъектов Российской Федерации – Приморскому и Хабаровскому краям, Амурской и Еврейской автономной областям, в АЗРФ – Республике Саха (Якутия).

#### *Автомобильный транспорт в АЗРФ.*

Через территорию регионов, полностью или частично входящих в АЗРФ, проходят автомобильные дороги федерального, регионального, межмуниципального и местного значения, в том числе дороги, не имеющие круглогодичного действия (табл. 3.2).

На территории Мурманской области участками федеральных трасс являются а/д Р-21 «Кола» (Санкт-Петербург – Петрозаводск – Мурманск – Печенга – граница с Королевством Норвегия), А-119 (Вологда – Медвежьегорск до пересечения с а/д «Кола»); в Архангельской – а/д М-8 «Холмогоры» (Москва – Ярославль – Вологда – Архангельск); в Ненецком автономном округе – А-381 (Нарьян-Мар – а/п Нарьян-Мар); в Красноярском крае – А-382 (Дудинка – а/п Алыкель (Норильск)); в Республике Саха (Якутия) – Р-504 «Колыма» (Якутск – Магадан), А-360 «Лена» (Невер – Якутск), А-331 «Виллой» (Тулун – Братск – Усть-Кут – Мирный – Якутск); в Чукотском автономном округе – А-384 (Анадырь – а/п Угольный, Колыма – Омсукчан – Омолон – Анадырь). При этом автодороги федерального значения отсутствуют в Ямало-Ненецком автономном округе. Входящий в АЗРФ г. Воркута (Республика Коми) связывает с Ухтой автодорога регионального значения.

Автодороги регионального и местного значения круглогодичного действия имеются в основном на территориях Мурманской, Архангельской областей, расположенных в европейской части России. В остальных регионах АЗРФ дорожная сеть в значительной степени представлена сезонными автодорогами (зимниками).

#### *Авиационный транспорт в АЗРФ.*

На территории АЗРФ регулярные и чартерные полеты более чем по 250 маршрутам выполняет 71 авиакомпания. По данным Росавиации [Федеральное агентство воздушного транспорта <http://www.favt.ru/>], в Государственном реестре гражданских аэродромов РФ зарегистрированы 73 аэродрома, находящиеся на территории АЗРФ.

Таблица 3.2

**Автомобильные дороги, проходящие через территории  
Арктической зоны Российской Федерации**

Субъект РФ	Территории, входящие в АЗРФ	а/д федерального значения*	а/д регионального и муниципального значения**
Мурманская область	Полностью	Р-21 «Кола» (Санкт-Петербург – Петрозаводск – Мурманск – Печенга – граница с Королевством Норвегия) А-119 (Вологда – Медвежьегорск до пересечения с а/д «Кола»)	Мишуково – Снежногорск, Снежногорск – Гаджиево, «Лотта», Кола – Мурманши, Мурманши – ж.-д. ст. Пяйве, Никель – Приречный – а/д «Лотта», Ура-Губа – Видяево, Заполярный – Сальмярви, Никель – Виртангемеи, Апатиты – а/д «Хибини», Апатиты – Залесье, Апатиты – Тик-Губа, Апатиты – Щучье, Апатиты – Кировск, Кировск – Титан, Кировск – Умба, Пиренга – Ковдор, «Лесная», Оленегорск – Пулозеро, Кола – ж.-д. ст. Выходной, Кола – Зверосовхоз, Кола – Серебрянские ГЭС, Пушной – Тайбола, Оленегорск – Ловозеро, Ловозеро – Нивка, Ловозеро – Геофизическая станция, Мончегорск – Верхний Нюуд
Архангельская область	МО «Онежский муниципальный район», «Приморский муниципальный район», «Мезенский муниципальный район», г. Архангельск, Северодвинск, Новодвинск, Новая Земля	М-8 «Холмогоры» (Москва – Ярославль – Вологда – Архангельск)	Архангельск – Белогорский – Пинега – Кимжа – Мезень, Лешуконское – Мезень, Каменка – Долгощелье, Развилка – Бычье, Каменка – Кимжа (зимник), Архангельск – Онега, Савинский – Ярнема – Онега, Онега – Тамница – Кянда – Пурнема, Онега – Ворзюгоры, Онега – Андозеро, ст. Няменьга – дер. Няменьга, Малошуйка – Абрамовская, пос. Вонгуда – ст. Вонгуда, Клещенко – Канзальельда, Верховье – Мудьюга – Кодино, Большой Бор – Поле, Исакогорка – Новодвинск – Холмогоры, Ижма – Лапоминка – Патракеевка, Нефтебаза – Ижма, Ширшинский, Ширша, Великое – Кипарово, Анисимово – Перхачево, Хорьково – причал, Кузьмино – Мордарово, Нижнее Ладино – Верхнее Ладино, Рикасиха – Лая, Лесная речка – Катунино, а/п Васьково – а/д М-8, Архангельск – а/п Таляги

Ненецкий автономный округ	Полностью	А-381 Нарьян-Мар – а/п Нарьян-Мар	Нарьян-Мар – Усинск (зимник), Нарьян-Мар – Красное, Нарьян-Мар – п. Искателей
Республика Коми	г. Воркута		Воркута – Ухта
Ямало-Ненецкий автономный округ	Полностью		Сургут – Салехард, Ноябрьск – Вынгапуровский, Тарко-Сале – Пурпе, Обьезд г. Салехарда, Салехард – Аэропорт, Лябытнанги – Харп, Салехард – Надым (зимник), Аксарка – Салемал – Панаевск – Яр-Сале (зимник), Лябытнанги – Мужы – Азовы – Теги (зимник), Уренгой – Красноселькуп (зимник)
Красноярский край	Таймырский Долгано-Ненецкий муниципальный район, г. Норильск, Туруханский район	А-382 Дудинка – а/п Алыкель (Норильск)	Енисейск – Ярцево – Ворогово – Бор (зимник), Кирсантьево – Устье – Машуковка (зимник), Бор – Верхнеимбатск (зимник), Туруханск – Селиваниха
Республика Саха (Якутия)	Аллаиховский улус, Анабарский национальный (долгано-эвенкийский) улус, Булунский улус, Усть-Янский улус, Нижнеколымский район	Р-504 «Колыма» (Якутск – Магадан, строящаяся), А-360 «Лена» (Невер – Якутск), А-331 «Вилуй» (Тулун – Братск – Усть-Кут – Мирный – Якутск, строящаяся)	Мирный – Ленск, Мирный – Удачный, Удачный – Оленек – Саскылах (зимник), Ленск – Олекминск – Якутск (зимник), Вилуйск – Жиганск (зимник), Вилуйск – Сангар (зимник), Покровск – Сангар (зимник), Якутск – Майа – Амга, Амга – Усть-Мая (зимник), Усть-Мая – Хандыга (зимник), Батагай – Алыта – Верхоянск – Батагай – Усть-Куйга (зимник), Усть-Куйга – Депутатский, Депутатский – Белая Гора (зимник), Усть-Нера – Хонуу – Белая Гора – Чокурдах (зимник), Усть-Нера – Зырянка – Среднеколымск – Черский (зимник), Батагай – Теплый Ключ (зимник), Якутск – Оймякон

Окончание табл. 3.2

Субъект РФ	Территории, входящие в АЗРФ	а/д федерального значения*	а/д регионального и муниципальнозначения**
Чукотский автономный округ	Полностью	А-384 Анадырь – а/п Угольный, Колыма – Омсукчан – Омолон – Анадырь (строющаяся)	Черский – Билибино, Билибино – Комсомольский, Пеневек – Комсомольский – Анадырь, Полярный – Ленинградский (зимник), Иульги – Эгвекино, Певек – Янра-най, Билибино – Кепервеем, Беринговский – Аляктаваам, Иульги – Комсомольский (зимник), Анадырь – Усть-Белая – Яры (зимник), Анадырь – Аляктаваам (зимник), Беринговский – Хагырка (зимник)

\* – в соответствии с постановлением Правительства РФ от 17.11.2010 № 928 (ред. от 28.04.2015);

\*\* – без дорог в пределах населенных пунктов, автоподъездов к населенным пунктам, станциям, мостовых переходов и переправ.

При этом 35 арктических аэродромов оборудованы светосигнальными системами, в том числе 11 – с огнями высокой интенсивности: Мурманск, Архангельск (а/п Талаги), Бованенково, Сабетта, Надым, Салехард, Новый Уренгой, Ноябрьск, Норильск, Игарка, Анадырь (а/п Угольный).

Среди 73 арктических аэродромов лишь 26 имеют искусственное покрытие (табл. 3.3). Из них два аэродрома – Норильск (а/п Алыкель) и Анадырь (а/п Угольный) – имеют класс «А»; два – Бованенково и Салехард – класс «Б». Половина арктических аэродромов с искусственным покрытием отнесена к классу «В»: Архангельск (а/п Талаги), Амдерма, Апатиты (а/п Хибины), Воркута, Игарка, Мурманск, Надым, Нарьян-Мар, Новый Уренгой, Ноябрьск, Певек, Хатанга, Ямбург. Шесть аэродромов с искусственным покрытием имеют класс «Г», это Архангельск (а/п Васьково), Варандей, Мезень, Соловки, Тикси, Чокурдах; три – класс «Е»: Диксон, Светлогорск и Туруханск.

Таблица 3.3

Распределение аэродромов АЗРФ по классам

Регионы, полностью или частично входящие в Арктическую зону Российской Федерации	Аэродромы в АЗРФ											ВСЕГО
	с искусственным покрытием						с грунтовым покрытием					
	Класс аэродрома						Класс аэродрома					
	А	Б	В	Г	Е	Всего	Г	Д	Е	Всего		
Мурманская область			2			2			1	1	3	
Архангельская область			2	2		4			14	14	18	
Ненецкий автономный округ			2	1		3			14	14	17	
Республика Коми			1			1				0	1	
Ямало-Ненецкий автономный округ		2	4			6	5			5	11	
Красноярский край	1		2		3	6				0	6	
Республика Саха (Якутия)				2		2	4			4	6	
Чукотский автономный округ	1		1			2	5	4		9	11	
ВСЕГО:	2	2	13	6	3	26	14	4	29	47	73	

Остальные 47 аэродромов АЗРФ имеют взлетно-посадочные полосы с грунтовым покрытием. Из них 14 аэродромов отнесены к классу «Г», 4 – к классу «Д» и 29 – к классу «Е». Также на территории АЗРФ размещены 44 посадочные площадки для самолетов и 222 – для вертолетов.

Важнейшей транспортной проблемой Арктики является развитие региональной авиации. В настоящее время в ведении Росавиации находятся три федеральных казенных предприятия (ФКП), включающих ряд региональных аэропортов на территории АЗРФ (табл. 3.4).

Таблица 3.4

**Региональные аэропорты в Арктической зоне  
Российской Федерации**

ФКП	Аэродромы
«Аэропорты Севера»	Батагай, Белая Гора, Депутатский, Жиганск, Мома, Нижнеянск, Оленек, Черский, Усть-Куйга, Чокурдах, Саккырыр, Среднеколымск, Саскылах, Тикси
«Аэропорты Чукотки»	Беринговский, Залив Креста, Кепервеем, Лаврентия Залив, Марково, Мыс Шмидта, Омолон, Певек, Провидения Бухта
«Аэропорт Амдерма»	Амдерма

Сегодня на полярных и приполярных маршрутах работают воздушные суда АН-140, АН-3, АН-74, АН-28 и АН-2, а также самолеты зарубежного производства L-410-UVF-E20, CESSNA 208B, Pilatus-рс 12, Emdraer 120, ДНС-6 и другие. Основу вертолетного парка в Арктике сегодня составляют отечественные машины Ми-2, Ми-8, Ми-14, Ми-17, Ми-26, а также Ка-26, Ка-126, Ка-226, Ка-32, из зарубежных – AW139.

Из альтернативных видов авиационного транспорта в Арктике используются аэросани, аэросани-амфибии и экранопланы. Разрабатываются также проекты по использованию беспилотных летательных аппаратов, дирижаблей и аэроботов.

Из всего изложенного в данной и предыдущих главах можно сделать вывод, что транспортная инфраструктура АЗРФ не является достаточной для обеспечения запросов практики.

## Часть 2

### ОСОБЕННОСТИ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ

Природные условия и экологическая ситуация оказывают самое непосредственное влияние на проведение транспортных операций и размещение объектов инфраструктуры. Если говорить шире, то природно-экологические условия создают специфические особенности региона, воздействующие на ведение бизнеса в целом [Тутыгин, Коробов, Чижова, Малинина, 2018].

Применительно к рассматриваемой в монографии проблематике эти особенности заключаются в следующем:

- низкие температуры воздуха, особенно зимой;
- полярная ночь;
- наличие ледяного покрова на подавляющей части водных объектов большую часть года;
- сильные течения и высокие колебания уровня на всей акватории;
- относительно высокая уязвимость экосистем;
- наличие особо охраняемых природных территорий и ограничений на хозяйственную деятельность.

Поэтому в дальнейшем изложении мы будем акцентировать внимание именно на эти обстоятельства, в то же время не отклоняясь от принятой в науке полноты описания природы территорий и акваторий и оценок экологической ситуации.

Описывая и анализируя условия природной среды, мы будем употреблять определения Арктика, Север и Арктическая зона, которые не являются синонимами. Обусловлено это различиями в занимаемом ими пространстве. Арктика начинается с Северного Полюса, но её южная граница до сих пор однозначно не определена [Коробов, Шумилова, 2016]. Понятие Север шире, чем Арктика. Здесь, в зависимости от контекста, встречается два толкования:

Север включает в себя Арктику, и Север рассматривается как территория между Арктикой и средними широтами. И то и другое понимание имеют право на употребление, необходимо лишь делать соответствующие оговорки. Мы в дальнейшем Север будем понимать в первом значении.

Арктическая зона Российской Федерации – административное понятие. В неё входит часть Арктики, северные территории и территории, приравненные к северным. Также необходимо принимать во внимание и постоянное расширение границ АЗРФ, что отличает её от Арктики и Севера, являющихся географическими объектами.

## Глава 4

### Природные комплексы суши

Учитывая, что цель исследования – разработка комплекса моделей, включая экспертно-аналитическую экспертную систему, создание транспортной инфраструктуры АЗРФ, в которой природные факторы играют одну из главных ролей, – более целесообразным представляется описание природных условий по природным комплексам. При этом описание будет идти с запада на восток и с севера на юг по субъектам и муниципальным образованиям РФ, входящим в состав АЗРФ. Такой подход позволит получить целостную картину природной среды, а показатели природных факторов легко стыкуются с экономическими и техническими показателями при картографировании исходной информации или же представлении её в других формах в зависимости от способа реализации моделей, где они являются параметрами.

Территория АЗРФ расположена в зонах тайги – южной, средней и северной – и тундр – южных, северных и арктических. На границе между ними узкой полосой проходит редколесье, а в долинах многих рек – заливные луга. Каждой из указанных зон присущи свои как характерные закономерности, общие для всей территории распространения, так и некоторые особенности, которые будут рассмотрены нами по ходу описания соответствующих территорий. Арктические острова будут рассматриваться отдельно.

*Рельеф.* На территории АЗРФ встречаются все основные типы рельефа: равнины, возвышенности, плоскогорья и горы, в том числе и на арктических островах. На территории *Мурманской области* в пределах Кольского полуострова имеются все основные формы рельефа: равнины, впадины, плато, горы и террасы. В целом рельеф достаточно гористый с высотами более 800 м.

Территория *Архангельской области, включая Ненецкий автономный округ*, расположена на севере Восточно-Европейской равнины и поэтому существенно ниже (за исключением некоторых островов Баренцева моря, которые к ней не относятся). Рельеф на её северо-западе и западе преимущественно низинный. Здесь имеются возвышенности – Кулойское плато, Северный и Средний Тиман, хребет Пай-Хой с высотами до 300-450 м.

На территории *Ямало-Ненецкого округа*, расположенного на севере Западно-Сибирской равнины, рельеф почти везде равнинный. Так, на полуострове Ямал высота не превышает 100 м. Но на юго-западе региона, ближе к Уралу, тянется горный массив со значительными – до полутора километров – высотами.

В *Таймырском Долгано-Ненецком районе Красноярского края* рельеф преимущественно равнинный. Однако на севере региона – полуострове Таймыр, ближе к побережью Карского и Лаптевых морей более чем на 1000 км с запада на восток тянутся горы Бырранга, ширина которых равна 200 км. Они представляют собой несколько параллельных гряд высотой до полукилометра и более, высоких, до километра и более, плато. На юге этого района расположены входящие в систему Среднесибирского плоскогорья плато Путорана – высшая точка 1700 м, и Анабарское плато – высшая точка 905 м. Между этими двумя горными странами расположена Северо-Сибирская низменность.

В *Якутии (Республика Саха)* большую часть территории занимают горные формы рельефа. Помимо Среднесибирского плоскогорья, расположенного на западе, в центральной и северо-восточной части республики есть несколько хребтов, наибольшими из которых являются Верхоянский хребет и хребет Черского с наибольшими высотами 2-3 км. На самом деле каждый из них представляет собой целую систему хребтов протяженностью более 1000 км и шириной от 100 до 250 км. На западе и северо-западе расположена Центральная якутская низменность. Низинные

ландшафты характерны и для приморских и северо-восточных территорий.

В *Чукотском автономном округе* самый высокогорный рельеф из всех субъектов АЗРФ. Только на прилегающим к морям территориях и в долинах рек располагаются низменности. Самая большая из них – Анадырская равнина. Наиболее крупные горные образования – Анюйское, Чукотское и Анадырское нагорья, Анадырское плоскогорье с высотами более 1 километра. Много вершин более полутора километров, наибольшая высота 1887 м.

На *островах* Северного Ледовитого океана рельеф преимущественно гористый. Максимальная высота поднятий – от 157 м на о. Вайгач и до 1547 м на Новой Земле. На рельеф оказывает влияние наличие ледников, увеличивающих высоту гор и плато.

*Геологическое строение.* Этот фактор в наименьшей степени влияет на транспортную инфраструктуру, и поэтому мы уделим ему меньшее внимание, чтобы описание природной среды было полным.

Особенностью *Мурманской области* является то, что она целиком расположена на Балтийском кристаллическом щите. В ней обнаружено большое количество минералов, часть из которых – более 100 – больше нигде не встречается.

Территория *Архангельской области* почти целиком расположена на северной окраине Русской плиты, имеющей двухъярусное строение: кристаллический фундамент и осадочный чехол, мощность которого достигает 8 км в северной части региона.

Геологическое строение *Ямало-Ненецкого округа* состоит из двух тектонических районов: молодой Западно-Сибирской плиты на западе и древней сибирской плиты на востоке, имеющей двухъярусное строение с осадочным чехлом различной мощности.

В северной части Красноярского края в *Таймырском Долгано-Ненецком районе* находится древняя Сибирская платформа, расположенная между Енисеем и Леной. Начиная со среднего триаса, примерно 220 млн лет назад, большая часть осадочного чехла платформы стала размываться. Для неё характерен диастрофизм, заключающийся в интенсивных тектонических движениях и деформациях земной коры, в наибольшей степени проявляющийся на Таймыре.

Территория *Якутии* состоит из восточной части Сибирской платформы и более молодой Верхояно-Чукотской складчатой области. Тектонические движения в целом не нарушили эти структуры.

Геологическое строение территории *Чукотского автономного округа* имеет сходные черты с Восточной Якутией и также принадлежит Верхояно-Чукотской складчатой области. Для осадочного чехла характерны кремнистые и кремнисто-вулканогенные толщи осадочных пород.

Геологическое строение *арктических островов* обладает значительным разнообразием и зависит от истории их образования [Геология Советской Арктики, 1957]. В их строении принимали участие разные типы континентальных и морских отложений, значительную роль в геологической истории играли тектонические и вулканические процессы. В тектоническом отношении некоторые из них являются продолжением континентальных областей в северном направлении. Так, о. Вайгач и архипелаг Новая Земля относятся к Урало-Пайхойской складчатой области. В целом же всем им присуща сложная структура и неоднородность слагающих их пород.

*Климат.* Климат и погодные условия Арктики целесообразнее описывать в целом для всего региона, поскольку для климатических характеристик присущи общие закономерности, обусловленные изменчивостью метеорологических полей вследствие уменьшения поступления солнечной радиации с широтой по направлению к полюсу, и пространственной непрерывностью этих полей.

Главными климатообразующими факторами в Арктике являются, помимо малого поступления солнечной радиации, влияние на климатические поля потоков тепла из Северного Ледовитого океана и прилегающих акваторий Атлантического и Тихого океанов, влияние азиатского континента и рельеф местности, формирующий местные особенности климата.

Почти вся территория АЗРФ лежит в двух климатических полях: арктическом и субарктическом. Граница между ними проходит несколько южнее полярного круга. И только относительно небольшие участки на юге относятся к умеренному поясу.

Зимой на *температуру воздуха* отепляющее влияние оказывают Атлантический и Тихий океаны, вследствие чего её значения к прилегающим к ним районам на несколько градусов выше, чем в центральной части Арктики. Самые холодные месяцы – январь и февраль, среднемесячные температуры в которых равны от  $-8^{\circ}\text{C}$  на морском побережье *Кольского полуострова* до  $-30^{\circ}\text{C}$  на *Таймыре* и в *Якутии*. На островах она немного выше. Минимальные температуры повсеместно, включая острова, могут снижаться до  $-40\dots-60^{\circ}\text{C}$ .

Летом картина несколько иная. В июле – наиболее тёплом месяце в году – самым тёплым сектором по-прежнему является западный – *Мурманская* и *Архангельская* области, а самым холодным – восточный, куда из-за многочисленных горных массивов не доходят тёплые воздушные массы из Сибири и Центральной Азии. Температура воздуха в середине лета изменяется от  $14-16^{\circ}\text{C}$  на западе до  $0^{\circ}\text{C}$  на востоке и островах. Максимальные значения могут превышать  $30^{\circ}\text{C}$ . Летом возможны заморозки.

Годовое количество *осадков* над сушей невелико и в среднем равно  $250-300$  мм, несколько больше в западном секторе –  $350-400$ , а на севере Новой Земли, и только в горах Бырранга и Чукотки возрастает до  $500-600$  мм. Над морской акваторией эти значения в два-три раза меньше. Несмотря на такое малое количество осадков, из-за низких температур воздуха испарение влаги в воздух ещё меньше, и вся территория АЗРФ находится в зоне избыточного увлажнения. В большинстве своём осадки выпадают в твёрдом виде, и снежный покров держится большую часть года. Толщина снежного покрова изменяется в широких пределах и в конце зимы в некоторых местах может достигать нескольких метров.

*Ветровой* режим зависит от глобальных процессов в атмосфере в Северном полушарии, региональных и местных особенностей. Основное влияние на циркуляцию атмосферы оказывают влияние стационарные центры атмосферного давления: Азорский и Арктический максимумы и Исландский и Алеутский минимумы. От расположения территории по отношению к этим барическим центрам зависят преобладающие ветры. Поскольку действие барических центров зависит от времени года, от их функционирования зависит господствующее в данный сезон направление ветра.

Скорость ветра в большей степени зависит от движения барических образований, таких как циклоны и антициклоны. С ними обычно связаны штормовые ветры. Местные особенности проявляются на границе суши с водными объектами – бризами и неровностями рельефа, какой является, например, новоземельская бора. Скорости ветра в Арктике нередко достигают 25-30 м/с, а в порывах на морском побережье и в горах и 60 м/с.

Сочетание мощного снежного покрова и штормовых ветров является причиной частых сильных *метелей*. Возникать они могут внезапно и длиться несколько суток. Метели создают серьёзные трудности всем видам транспорта и нередко являются причиной гибели людей.

Для авиации ограничивающим фактором является и низкая *облачность*. В среднем за год облака покрывают две трети неба, а над морями этот показатель ещё более высок. Максимум облачности приходится на август-октябрь, когда поверхность морей, рек и озёр открыта ото льда, а процесс ледообразования только начинается, что увеличивает испаряемость с водной поверхности. Минимум, наоборот, имеет место с февраля по апрель – в период наиболее мощного ледяного покрова. По этой же причине наблюдается следующая закономерность: в Арктике среднегодовой ход облачности находится в противофазе с ледовитостью в Северном Ледовитом океане [Чернокульский, 2012].

В Арктике часто образуются *туманы*, особенно в прибрежной зоне. Длительность их может продолжаться несколько суток. Такие явления, как *грозы* и *град* в Арктике встречаются относительно редко.

*Поверхностные воды суши.* Вся территория АЗРФ находится в зоне высокой обводнённости. Это вызвано следующими обстоятельствами. Во-первых, как указано выше, наблюдается преобладание осадков над испарением. Во-вторых, преобладает уклон поверхности в северном направлении, вследствие чего реки текут в большинстве своём на север, собирая по пути многочисленные притоки. В-третьих, неровности рельефа создают условия для образования озёр. В-четвёртых, наличие многолетнемерзлых пород препятствует проникновению осадков в грунт. Поэтому в АЗРФ так много рек, озёр и болот, занимающих

огромные территории и создающих особые условия для хозяйственной деятельности.

**Реки.** Водотоки на территории АЗРФ образуют густую речную сеть. Почти все они принадлежат бассейну Северного Ледовитого океана. Преобладают средние и малые реки – их количество таково, что никто не берётся указать точное число, имеющее порядок сотен тысяч. Но основную роль играют крупные и большие реки, площадь водосбора которых превышает 50 тыс. км<sup>2</sup>: Онега, Северная Двина, Мезень, Печора, Надым, Пур, Таз, Обь, Енисей, Пясина, Таймыра, Хатанга, Анабар, Оленёк, Лена, Яна, Индигирка, Алазея, Колыма и Анадырь. Основные их характеристики приведены в табл. 4.1 [Российская Арктика в XXI веке..., 2013]. Все они являются крупными транспортными артериями, служат источниками водоснабжения, обладают колоссальным энергетическим потенциалом, значительными биологическими ресурсами.

Таблица 4.1

Река	Площадь бассейна, тыс. км <sup>2</sup>	Длина, км	Куда впадает
Онега	56,9	416	Белое море
Северная Двина	357	1310	
Мезень	78,0	966	
Печора	322	1810	Баренцево море
Обь	2990	5410	Карское море
Надым	64,0	545	
Таз	150	1400	
Пур	112	390	
Енисей	2580	4092	
Пясина	182	818	
Таймыра	124	754	
Хатанга	364	1636	море Лаптевых
Анабар	100	939	
Оленёк	219	2292	
Лена	2490	4400	
Яна	238	872	

Окончание табл. 4.1

Река	Площадь бассейна, тыс. км <sup>2</sup>	Длина, км	Куда впадает
Индигирка	360	1726	Восточно-Сибирское море
Алазея	64,7	498	
Колыма	647	2510	
Анадырь	191	1150	Берингово море

Реки замерзают на 9-10 месяцев в году, некоторые промерзают до дна; на материке вскрываются в мае-июне, замерзают в октябре, на островах, соответственно, в середине июля – начале сентября.

**Озёра.** На территории всех субъектов АЗРФ находится большое количество озёр, особенно небольших. В пределах материковых тундр и на островах много озёр, большую часть года находящихся подо льдом. Крупнейшее озеро – Таймыр (на одноимённом полуострове). Большинство озёр мелкие и в холодный период, как и некоторые реки, промерзают до дна.

**Болота.** Вся территория АЗРФ покрыта болотами разного типа. На ней встречаются болота всех трёх типов: низинные, верховые и переходные [Афанасьева, Василенко, Терёшина, Шеремет, 1979]. Однако площадь болот и заболоченных территорий оценить очень непросто, поскольку нет общепринятых подходов к проведению их границ, которые далеко не всегда явно обозначены в природе [Вомперский, Сирин, Сальников, Цыганова, Валяева, 2011]. В северных регионах России болота могут занимать от 40 до 70% территории [Кац, 1971], что создаёт существенные трудности для транспортировки грузов и строительства объектов транспортной инфраструктуры.

**Ледники.** На арктических островах и в горах большое количество ледников. Они создают особые ландшафты, местами покрывая большую часть территории – до 85% на архипелаге Земля Франца-Иосифа. Общая их площадь примерно равна 50-60 тыс. км<sup>2</sup>. Нижняя граница ледников уменьшается с севера на юг и с запада на восток.

Ледники в Арктике относятся к покровному типу, которым свойственны купола, достигающих в своей центральной части толщины 300-400 м [Исаченко, Шляпников, 1989]. Купола могут

сливаться. Тогда образуются щиты, самый крупный из которых на Северном острове Новой Земли имеет площадь 19 000 км<sup>2</sup>. Некоторые ледники спускаются к морю, где от них откалываются большие куски – айсберги.

Площадь ледников и запасы льда в них ежегодно сокращаются [Оледенение Северной Евразии..., 2007]. По оценкам специалистов [Котляков, Глазовский, Фролов, 2010], с 1952 по 2001 год площадь ледников в российском секторе Арктики уменьшилась на 725 км<sup>2</sup>, а их объём – на 15793 км<sup>3</sup>.

*Растительность.* Растительный покров зависит от природной зоны: чем больше света и тепла, тем он богаче и интенсивнее [Перельман, Касимов, 1999; Исаченко, Шляпников, 1989]. На южной границе АЗРФ преобладает северная тайга, для которой характерны ельники и разреженные березово-еловые леса. Далее на север, в лесотундре, наиболее распространены заросли кустарников и типичная болотная растительность, встречаются участки еловых и берёзовых редколесий. В тундре преобладают травянисто-моховые сообщества, кустарники и ивняки. Севернее, в зоне арктических пустынь, покров становится фрагментарным и представлен травянистыми растениями, мхами и лишайниками. Самая бедная растительность в Арктике на поверхности ледников – всего лишь три вида цветных водорослей [Исаченко, Шляпников, 1989]. Они окрашивают лёд в разные цвета.

Биомасса растительности колеблется в широких пределах: от 40-300 ц/га в тундре до 500-3000 ц/га в тайге, а её прирост зависит от температурных характеристик сезона [Перельман, Касимов, 1999].

*Животный мир.* В отличие от распространения растительности по широте, животные делятся всего лишь на два зональных типа: таёжный и тундровый. Для тайги наиболее характерны белка, куница, ласка, горностай, бурый медведь и лось. Многочисленны представители грызунов. В тайге гнездятся порядка 300 видов птиц.

В тундре животный мир значительно беднее как по численности, так и по видовому составу. Среди млекопитающих преобладает песец, много грызунов. Большое поголовье северных оленей. Белый медведь – один из самых крупных хищников, является символом Арктики. В Арктике большое количество птиц, которые на островах образуют многочисленные базары.

## Глава 5

### Морские воды

Северный Ледовитый океан (СЛО) расположен в полярной области Северного полушария (рис. 5.1)<sup>1</sup>. Его площадь равна 14,75 млн км<sup>2</sup>, средняя глубина равна 1225 м, наибольшая – 5527 м [Атлас океанов, 1980]. В его состав входит 11 морей, занимающих 70% его площади, 6 из которых – Баренцево, Белое, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское – омывают берега территории АЗРФ. К ним также следует добавить Берингово море, принадлежащее Тихому океану, которое с востока омывает берега Чукотского автономного округа.

Океан граничит с Атлантическим и Тихим океанами, евразийским и североамериканским континентами. С Атлантическим оке-

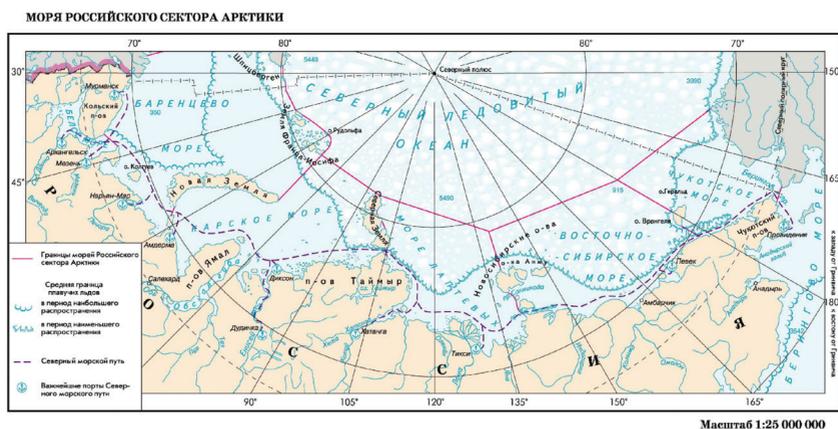


Рис. 5.1. Северный Ледовитый океан [Природа. Экология, 2004-2008]

<sup>1</sup> Авторы немало времени потратили на выбор рисунка из множества вариантов. В конце-концов остановились на этой карте ввиду её информативности при малой нагрузке, несмотря на один существенный недостаток: трасса Северного Морского Пути на ней проложена неверно! Пусть она будет примером того, что и солидные издания могут грешить серьёзными ошибками, и показывать, что ко всей информации необходимо относиться критически.

аном граница проходит по восточному входу в Гудзонов пролив, по северной границе Дэвисова пролива, южным границам Гренландского и Норвежского морей. С Тихим океаном СЛО граница проходит по линии мыс Уникын (Чукотка) – полуостров Сьюард (Аляска).

На акватории СЛО расположено множество островов, по количеству которых он занимает второе – после Тихого – место среди всех океанов. Однако наиболее крупные из них принадлежат американскому сектору. Но и в состав АЗРФ входит несколько достаточно крупных архипелагов и островов, наиболее значимыми из которых являются (с запада на восток): Соловецкие, Моржовец, Земля Франца-Иосифа, Колгуев, Новая Земля, Вайгач, Новосибирские острова, Северная Земля и Врангеля.

*Геологическое строение.* По геологическому строению и рельефу дна СЛО традиционно делится на три части (бассейны): Северо-Европейский, Канадский и Арктический. К территории АЗРФ примыкает Арктический бассейн, который к тому же частично – отдельными островами – входит в её состав.

По площади Арктический бассейн составляет основную часть океана. Более его половины занимает континентальный шельф, протяженность которого в среднем равна 800 км (450-1700 км). На разных участках арктический шельф имеет собственные названия по имени морей: Баренцевоморский (в него входит и акватория Белого моря), Карский, Лаптевский и Восточно-Сибирско-Чукотский.

В структурно-геологическом отношении Баренцевоморский шельф представляет собой платформу с мощным осадочным чехлом – 100-350 м. На дне имеются впадины и прогибы, а также ряд крупных возвышенностей. Северная и западная часть Белого моря сложены Балтийским щитом, а восточная – Русской платформой.

В северной части шельф Карского моря пересекает погружённое звено так называемого Уральско-Новоземельского мегантиклинория. Севернее находятся два жёлоба и Центральнокарская возвышенность. На дне Карского моря прослеживаются явно выраженные продолжения долин Оби и Енисея. Вблизи архипелагов Новая Земля и Северная Земля, полуострова Таймыр на дне распространены различные реликтовые ледниковые формы рельефа.

Шельф моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря представляет собой аккумулятивную равнину. На дне Чукотского моря

преобладают затопленные денудационные равнины. Южная часть этого моря представляет собой глубокую впадину, заполненную рыхлыми отложениями и эффузивами – застывшими вулканическими породами.

За шельфовой кромкой расположен материковый склон. В Арктическом бассейне он расчленён несколькими крупными широкими подводными каньонами.

По дну Арктического бассейна проходят три срединно-океанических хребта: Гаккеля, Ломоносова и Менделеева. Глубоководная часть Арктического бассейна с глубинами более 2500 м занята хребтом Гаккеля, который начинается от долины Лены, далее протягивается параллельно Евразийской подводной окраине и прилегает к материковому склону в море Лаптевых. Хребет Ломоносова тянется от подводной части севера Гренландии до материкового склона моря Лаптевых. Он представляет собой сплошной монолит. Глубины над ним 850-1600 м. Следует отметить, что под хребтом Ломоносова залегает земная кора континентального типа, т.е. он является продолжением суши.

Хребт Менделеева тянется от подводной окраины Восточно-Сибирского моря севернее острова Врангеля к острову Элсмир в Канадском архипелаге. Глубины над ним 1200–1600 м. В отличие от хребта Ломоносова, он имеет глыбовую структуру и сложен породами, характерными для океанической коры.

В Арктическом бассейне имеются несколько плато и глубоководных котловин. Глубины над котловинами весьма значительны – от 2800 м. Под всеми котловинами земная кора не имеет гранитного слоя. Мощность океанической коры под ними до 10 км за счёт мощного осадочного слоя.

Дно Арктического бассейна сложено исключительно терригенными осадками, мощностью до 6 км. Формируется осадочный слой в основном за счёт выноса твердых осадков реками и ветровыми потоками, переносящими мелкие частицы пыли с континентов. В западном секторе – в Белом, Баренцевом и Карском морях – часто встречаются пески. Здесь же преимущественно распространены и железо-марганцевые конкреции.

*Морфология дна и берегов.* Бассейн СЛО можно разделить на две большие части: глубоководную и мелководную шельфовую, причем на долю евразийского сектора приходится более полови-

ны её площади [Северный Ледовитый и Южный океаны, 1985]. На формирование шельфа СЛО большое влияние оказывает осадконакопление, выравнивающее рельеф дна путём отложения и перетотложения твёрдых частиц. Источник поступления осадков – вынос терригенного материала реками и размыв берегов. В связи с таким происхождением осадков в его составе преобладают илистые частицы. Часть осадочного материала приносится из материка ветром [Шевченко, 2006]. В перетотложении осадков значимую роль – прямую и косвенную – также играет лёд [Лисицын, 1994]. Речные и морские льды, помимо выноса обломков пород и содержащихся в замёрзшей воде веществ на другие акватории, также килиями торосов взрыхляют осадки на дне, которые затем течениями и волнением переносятся в другие места.

Шельф СЛО отличается сложной структурой с обширными мелководьями и глубоководными впадинами. На *Баренцевоморском* шельфе имеется несколько крупных впадин и подводных возвышенностей. Состоит он из двух плит – Баренцевской и более молодой Печорской плиты Русской платформы – на юго-востоке. В рельефе дна распространены остаточные формы ледникового происхождения. Выделяются хорошо выработанные затопленные речные долины и древние береговые линии.

Следует отметить, что не вся акватория Баренцева моря промерена. На навигационных картах юго-восточной части, в Хайпудырской губе, обширные мелководья затрудняют гидрографические работы и даже часть побережья указана пунктиром.

Весьма своеобразен рельеф дна в *Белом* море. На его формирование большое влияние оказывают приливные течения и вынос взвешенных веществ речным стоком, особенно в северо-восточной части, где отмечаются несколько гряд. Из-за выноса большого количества твердого вещества реками в Мезенском и Двинском заливах дно постоянно меняет глубины, замываются фарватеры. В *Кандалакшском* заливе, на северо-западе моря, расположена глубокая впадина – до 350 м глубиной. Центральная часть моря за счёт осадконакопления выровнена; в южной части, в *Онежском* заливе, глубины небольшие, но имеется множество мелких островов, представляющих опасность для навигации.

Баренцевоморский шельф отделен от *Карского* глубоководным желобом Святой Анны. Шельф Карского моря делится на

две части – северную и южную. Из-за выхода на поверхность коренных пород рельеф северной части очень неровный со множеством островов. Южная часть является продолжением Западно-Сибирской равнины, в пределах которой продолжаются долины Енисея, Оби и других рек.

Шельф моря *Лантевых* мелководный и ровный. На дне встречаются затопленные речные долины. Такой же рельеф дна характерен и для *Восточно-Сибирского* моря. Вдоль берега имеют место крупные гряды высотой от 5 до 10 м, происхождение которых до сих пор не выяснено. Протяжённость их может составлять десятки километров. Шельф *Чукотского* моря преимущественно равнинный. Его особенностью являются затопленные долины, глубина которых больше, чем у прилегающих к ним участков дна.

Для СЛО и его морей характерны практически все типы берегов [Каплин и др., 1991]. Берега юго-западной части *Баренцева моря* определяются геологическим строением Кольского полуострова. Они занимают восточную часть Балтийского кристаллического щита, берега которого расчленены древними ледниками на множество фиордов и фиардов. Наиболее крупные из них образуют удобные для строительства портов глубоководные заливы, такие как Кольский, глубина которого достигает 300 м. Берега фиордов и фиардов высокие и устойчивы к воздействию моря. Дно вдоль Кольского полуострова резко уходит вниз, достигая глубины 100 м всего через 5-10 км от берега.

Иная картина наблюдается в юго-восточной части моря. Берега здесь не такие высокие, местами совсем низкие, затапливаемые морем во время приливов и штормовых нагонов. Значительная часть берегов сложена из многолетнемёрзлых пород, оттаивающих в тёплый период года и интенсивно размывающихся под действием моря. Такие берега называются термоабразионными. Наряду с ними широко представлены и аккумулятивные берега, для которых характерно накопление осадочного материала. Также встречаются берега, где процессы размыва и аккумуляции вещества чередуются. Такие берега получили название абразионно-аккумулятивных. Эти же типы берегов характерны и для островов Баренцева моря.

Очень сложна конфигурация берегов в *Белом море*. По изрезанности береговой черты Белое море вряд ли имеет аналоги в

Мировом океане. Берега Кольского полуострова, по сравнению с баренцевоморскими, более выровнены. Врезающиеся в берег заливы здесь не такие протяженные и глубокие. Берег почти на всей протяженности аккумулятивный, но встречаются и абразионные участки. Интенсивной расчленённостью характеризуется и берег от Кандалакши до Онеги, но впадающие в него заливы ещё меньше, чем у Кольского полуострова. На юго-западе Онежского залива берега заболочены. Высота берегов невелика. Почти везде берега аккумулятивные. Восточная часть Онежского залива большей частью относится к абразионно-аккумулятивному типу, при этом аккумулятивные участки более протяжённые, чем эрозионные. Далее на восток, к Архангельску, берег ещё более выровненный абразионно-аккумулятивными процессами. Такой же тип берега присущ и северной части Двинского залива, и восточному побережью пролива Горло. Между этими двумя берегами расположена разветвлённая дельта Северной Двины с многочисленными островами, рукавами и протоками. В Мезенском заливе все берега абразионные. Сложены они рыхлыми породами, и вследствие высоких приливов и сильных течений скорость размыва берегов на некоторых участках достигает 3-5 м за год, что очень много. Преобладание абразионных берегов, хоть и не столь интенсивное, как в Мезенском заливе, характерно и для западных берегов полуострова Канин. Наиболее важной чертой береговой зоны Белого моря является повсеместное наличие осушек – участков морского дна, обнажающихся во время отлива. Ширина их может достигать нескольких километров. Они играют важную роль для судоходства и оказывают заметное влияние на прибрежные экосистемы.

Берега *Карского моря* разделяют на 5 крупных участков: южный берег Байдарацкой губы вместе с побережьем Югорского полуострова; берега полуострова Ямал; берега Тазовского полуострова; берега Гыданского полуострова и Енисейского залива; берега полуострова Таймыр. Берег от Югорского Шара до Амдермы расчленён абразией на ряд бухт. Берега Байдарацкой губы выровнены термоабразией, западный её берег – преимущественно аккумулятивный, южный и восточный – аккумулятивно-эрозионные. Западный берег Ямала с юга до мыса Харасавэй абразионно-аккумулятивный бухтовый, севернее от него – чисто абразионно-аккумулятивный. На этом участке имеются места с интенсивным

отступанием берегов со скоростью 3 м в год. Северный берег Ямала – выровненный термоабразионный. Берега Обской и Тазовской губ отличаются большим разнообразием. Западный берег Обской губы начинается как аккумулятивный и переходит на юге в абразионно-бухтовый с широкими лайдами – заболоченными и затопляемыми во время прилива и нагонов берегами. Южнее устьевой области реки Тамбей берега уже аккумулятивно-абразионные, бухтовые. Южную часть Обской губы занимает многорукавная дельта Оби. Она находится в стадии формирования, которое протекает достаточно интенсивно. Восточный берег губы на юге аккумулятивно-абразионный. Большой участок берега между мысами Островной и Парусный, протяженностью более 130 км, является чисто абразионным. В Тазовской губе, примыкающей с восточного берега к Обской губе, берега по своему строению сходны с берегами Обской губы и преимущественно аккумулятивно-абразионные. Встречаются лагуны и лайды; на северо-востоке имеется ряд бухт. Северо-восточный берег Тазовской губы термоабразионный, с высокой скоростью размыва – до 8 м в год.

Берега Гыданской губы мало изучены. Некоторые исследователи предполагают [Каплин и др., 1991], что по своему происхождению и строению они сходны с берегами северной части Обской губы. Сходны по своему строению и типу с берегами Обской и Тазовской губ и западные берега Енисейского залива. Скорость их размыва также велика и достигает 5-6 м в год. Восточный же берег залива в целом стабилен, но и в его пределах встречаются абразионные участки со скоростью отступления 3 м в год. Кутовая (угловая) часть Енисейского залива занята обширной дельтой протяженностью около 200 км. Дельта Енисея пребывает в стадии активного формирования, образуя острова и новые протоки. Берег полуострова до Диксона расчленён на множество заливов фиардового типа. Восточнее проходит достаточно протяжённый прямолинейный участок, совпадающий с одним из широтных разломов. Далее на восток выровненный абразией берег сменяется разветвленной дельтой Пясины, процесс образования которой ещё не завершён.

Восточнее Пясины берега расчленены извилистыми заливами с низкими скалистыми берегами, окаймлены многочисленными каменистыми островами. Берег – шхерно-фиардовый, в малой

степени подверженный воздействию волн и течений. Далее берега Таймыра устойчивые, отступление берегов, да и то небольшое, имеет место местами в заливе Толля и проливе Вилькицкого – 0,2 м в год. Северо-восточное побережье полуострова, принадлежащее уже морю *Лантевых*, фиардово-шхерное.

Берега моря Лаптевых сложены в большинстве своём рыхлыми породами и легко поддаются размыву. Побережье континентальной части моря по условиям формирования делится на две большие части: Лено-Анабарскую и Янскую. Восточная часть Таймыра в основном сложена рыхлыми морскими и аллювиальными отложениями большой мощности. Берег постепенно переходит от фиардово-шхерного к чередующимся абразионным и аккумулятивным формам. Берега Хатангского залива, представляющего собой крупный эстуарий, подвержены интенсивному разрушению вследствие термоабразии. Ближе к устью Хатанги более обширными становятся илистые осушки. В Анабарском районе широко распространены абразионные и термоабразионные процессы. На некоторых участках берега отступают со скоростью 4 м в год.

Крупную морфологическую структуру образует дельта Лены – наибольшая дельта на побережье СЛО и одна из самых больших в Мировом океане. Её площадь равна 45 000 км<sup>2</sup>. (Для сравнения: площадь Бельгии равна 30 500 км<sup>2</sup>, и на ней постоянно проживают почти 12 млн. человек.) В дельте большое количество островов, на многих из которых имеются озера, правда, преимущественно мелкие, площадью менее четверти квадратного километра. Общая протяженность протоков порядка 10 000 км, если не более. Для берегов Янского района берега характерна крупномасштабная расчленённость. Здесь много заливов и бухт. В пределах этого берега выделяется дельта Яны площадью более 5000 км<sup>2</sup>.

Берега *Восточно-Сибирского* моря отчётливо разделяются на два района – большую западную часть и меньшую восточную. Восточная часть холмистая и местами даже гористая; западная не такая возвышенная. Берега моря большей частью выровненные, термоабразионно-аккумулятивные. Однако встречаются участки – восточнее Индигирки – с большой скоростью отступления берегов, достигающей 11 м в год. Довольно большую дельту, площадью 3000 км<sup>2</sup>, образует Колыма. Эта дельта расположена в бывшем заливе и имеет три рукава.

Берега российской части *Чукотского* моря делятся на пять районов. Уже само их количество говорит о разнообразии типов берегов. Основной его чертой является множество лагун, причём лагуны также различаются по происхождению и форме. В целом же, насколько можно судить по литературе, берега этого моря наименее изучены из всех морей российской Арктики.

Что касается берегов островов СЛО и его морей, то они также различаются большим разнообразием, особенно крупные. На этом этапе исследований мы их описывать не считаем целесообразным.

В завершение этого раздела следует отметить две важные особенности состояния арктических берегов: наличие большого количества осушек и отступающих участков. Первое влияет на безопасность мореплавания в прибрежной зоне, в том числе и маломерного флота, второе ограничивает строительство объектов транспортной инфраструктуры. И эти процессы будут продолжаться. Так, по некоторым оценкам [Огородов, 2011], отступление берегов в XXI веке на некоторых участках может достичь нескольких сотен метров.

*Гидрологические условия.* На гидрологические процессы в СЛО и его морях наибольшее влияние оказывают ледяной покров и речной сток. Однако и другие факторы могут играть существенную роль в формировании гидрологических процессов, а через них оказывать влияние на динамику вод.

Прежде всего, чтобы не было терминологической путаницы, отметим, какие процессы в океанологии относятся к гидрологическим. В широком смысле к гидрологическим относятся все процессы, протекающие в водных объектах. Однако таких характеристик набирается слишком много, и целесообразнее океаны и моря описывать, исходя из формального разделения процессов на группы. Понятно, что такое деление носит условный характер, поскольку все процессы в океанах и морях взаимосвязаны и взаимообусловлены. Более того, они во многом зависят от внешних факторов, таких как климат и речной сток. Тем не менее, деление гидрологических показателей на группы целесообразно по причине выделения из них на транспортную инфраструктуру влияющих факторов.

В рамках настоящего исследования показатели гидрологического режима разбиты на собственно гидрологические – термоха-

линные (температура и солёность), водные массы, водный баланс, речной сток – и гидродинамические – течения, волнение, уровень, фронтальные зоны. В отдельную группу выделены ледовые условия ввиду их своеобразия и исключительной важности для рассматриваемой задачи.

На формирование гидрологического режима СЛО и его морей оказывают влияние:

- положение в высоких широтах, ограничивающее поступление тепла из атмосферы;
- сток рек;
- водообмен с Атлантическим и Тихим океанами.

Тепловой баланс поверхности акватории СЛО в холодный период года везде отрицательный: потоки тепла направлены из океана в атмосферу. В летний период тепло передаётся из атмосферы в океан. В целом же за год на большей части акватории СЛО баланс тепла отрицательный, и только в некоторых морях, да и то не всей акватории, он положителен.

Помимо теплового баланса, на температурный режим арктических вод влияет адвекция тепла течениями из смежных акваторий, особенно из Атлантического океана. В самом Арктическом бассейне температура воды на поверхности практически не изменяется и близка температуре замерзания солёных океанских вод –  $-1,7$  °С. С глубиной температура повышается вследствие приноса тепла течениями и эффекта повышения температуры при сжатии воды под собственным весом.

В морях температура воды меняется в широком диапазоне в зависимости от сезона. Поскольку зимой, точнее, когда моря покрыты льдом, температура поверхностных вод, как и в Арктическом бассейне, за одним исключением, близка к температуре замерзания, то имеет смысл сконцентрироваться на её характеристиках только для летнего сезона, когда наблюдается её наибольший прогрев [Залогин, Косарев, 1999].

В *Баренцевом* море – единственном из прилегающих к АЗРФ – значительная часть акватории свободна ото льда в течение всего года. Это вызвано отепляющим воздействием Атлантики на западную и центральную часть моря. Летом температура воды на поверхности близка температуре воздуха и равна на юге моря  $8-9$  °С,  $3-5$  °С в центральной части и принимает отрицательные значения на севере.

В мелководной юго-восточной части летом вода хорошо прогревается от поверхности до 10-15 м, далее скачком резко понижается. Образующийся при этом выраженный термоклин является поверхностью раздела водных масс. На таких разделах плотность воды заметно изменяется, и они служат накопителями определённых загрязнителей, плотность которых соизмерима с плотностью воды.

В *Белом* море распределение температуры воды как на поверхности, так и на глубинах весьма неоднородно. Поскольку Белое море наименее солёное по сравнению с другими морями – об этом ниже, то температура замерзания воды, которая является функцией солёности, будет несколько выше:  $-0,5$  –  $-0,7$  °С в заливах,  $-1,3$  °С – в центральной части и  $-1,9$  °С в северных районах моря. В тёплый период разброс температур значительно выше. В августе они принимают значения  $15$  °С и более в вершинах заливов, постепенно понижаясь к центру и в северном направлении до  $7-8$  °С. В некоторых районах моря вследствие интенсивного перемешивания образуются гомогенные слои, в пределах которых температура одинакова от поверхности до дна.

В *Карском* море на термохалинные условия большое влияние оказывает речной сток, на долю которого приходится более половины стока морей Российской Арктики. Вода в море прогревается слабо, поскольку поступающее на его поверхность тепло расходуется на таяние льда, а это процесс достаточно энергозатратный. Поэтому даже в летние месяцы – июле и августе – температура на поверхности не превышает  $6$  °С. Прогрев поверхностного слоя небольшой, и в самых южных районах не превосходит  $15-18$  м.

В море *Лаптевых* поверхностные температуры несколько выше, и на некоторых участках летом поднимаются выше  $10$  °С. В целом же для моря Лаптевых характерно различие средних температур для западной и восточной частей:  $2-3$  °С и  $6-8$  °С соответственно. Прогревается слой  $10-15$  м.

В *Восточно-Сибирском* море на открытой акватории летом температура воды не превышает  $2-3$  °С, и только в мелководных заливах и бухтах она несколько выше –  $7-8$  °С. Поверхностный слой прогревается слабо, всего на несколько метров. Восточно-Сибирское море – самое холодное море России.

В *Чукотском* море, как и в море Лаптевых, имеются заметные различия между западной и восточной частями, где летом темпе-

ратура воды на поверхности равна 4 °С и 7-8 °С соответственно. В Беринговом проливе она может повышаться до 14 °С. Тем не менее, прогрев воды летом небольшой – до 20 м, хотя на некоторых участках море и может прогреваться до дна.

Солёность – более консервативная характеристика, чем температура, и мало зависит от теплового баланса. На неё главное влияние оказывают процессы ледообразования и ледотаяния и особенно речной сток. Эти процессы вызывают значительные сезонные колебания солёности. Величина солёности океанских вод более низкая относительно других океанов и в среднем равна 28-34 ‰. Зимой вода более солёная, весной и летом – менее. Таяние льдов и паводок на реках существенным образом распресняют морские воды. В зависимости от интенсивности таяния льда и объёма стока солёность может понижаться до нескольких промилле в прибрежной зоне.

Речной сток играет важную роль не только в термохалинных процессах, но также в динамике вод, гидробиологии и загрязнении акваторий. Как уже отмечено выше, его величина значима для всех арктических морей, но в наибольшей степени для Белого и Карского.

В Белом море речной сток составляет 4% водного баланса [Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1991]. Это очень большая величина. Поэтому воды Белого моря наименее солёные из всех морей Российской Арктики. В Карском море из-за огромных объёмов поступающих с сибирскими реками пресных вод 40% площади моря во время паводка находится под влиянием речного стока.

В остальных морях в процентном отношении влияние речного стока меньше, но всё равно заметное. О влиянии речного стока на гидрохимический и гидробиологический режим морей и экологическую ситуацию в них будет сказано ниже в соответствующих разделах.

К динамическим характеристикам морских вод относятся течения, колебания уровня и волны. На движение вод оказывают влияние рельеф дна, конфигурация береговой черты, метеорологические условия, речной сток и ледяной покров. Рельеф дна вызывает трение между потоками движущихся частиц и твёрдой поверхностью, следствием чего становится замедление движения жидкости и отклонение потока от первоначального направления.

Берега являются естественной границей на пути проникновения вод на смежные акватории, изменяют живое сечение потока, ускоряя или, наоборот, замедляя его, и боковым трением замедляют и отклоняют потоки воды. Из метеорологических характеристик на динамику вод наибольшее влияние оказывают ветер и атмосферное давление. Ветер через касательные напряжения вызывает течения и волны, давление – так называемые анемобарические волны, которые индуцируют длинные волны на поверхности моря. Подходя к берегу, они становятся причиной резкого подъёма уровня и, следовательно, наводнений. Это явление получило название штормовой нагон. Речной сток выносит в океаны и моря большое количество воды, которая растекается на поверхности и продолжает движение в виде течения.

Ледяной покров, с одной стороны, ограничивает действие метеорологических факторов, а с другой – вызывает трение вод о нижнюю поверхность, влияя тем самым на скорость и направление течений.

Течения, в зависимости от вынуждающей силы, делятся на плотностные, градиентные, ветровые, стоковые и приливные. Плотностные течения возникают вследствие неоднородного распределения плотности воды по пространству, происходящего из-за неодинаковой температуры, солёности и взвешенного вещества воды. Возникающие при этом градиенты плотности, согласно законам физики, порождают течения, которые направлены в сторону меньшей плотности воды.

Растекание более лёгких речных вод на поверхности, как и неоднородность поля атмосферного давления, приводит к перекосу уровня. Возникающие при этом градиенты давления стремятся выровнять поверхность, что приводит к возникновению течений, которые получили название градиентных.

Ветровые течения, как следует из их названия, вызываются ветром, трение которого о поверхность моря увлекает за собой верхний слой воды. Стоковые течения возникают при впадении рек в моря. Массы речной воды по инерции продолжают двигаться по морской акватории и для крупных рек прослеживаются на сотни километров.

Приливные течения вызываются силой гравитации крупных небесных светил, прежде всего Луны и Солнца. Они носят пери-

одический характер, зависящий от периода обращения Луны вокруг Земли и Земли вокруг Солнца. Понятно, что в «чистом» виде в природе эти течения не встречаются. Обычно это сочетание течений, спектр которых зависит от местных и региональных условий. Рассмотрим их по акваториям СЛО и морей. Отметим, что сочетание это будет различным, как и скорости и направления течений.

Циркуляция вод собственно СЛО определяется главным образом за счёт притока вод из Атлантического и Тихого океанов и водообменном с морями. Особенно большую роль играют тёплые атлантические воды, влияние которых прослеживается далеко на восток. Скорости течений, приходящих из Атлантики, колеблются в пределах 20-50 см/с. Течения, приходящие из Тихого океана, несколько слабее.

Ветровые течения существенно ниже – порядка 10 см/с, и причина этого – ледяной покров, препятствующий образованию таких течений. Плотностные течения, как правило, ещё слабее, и скорости их составляют величину порядка нескольких см/с.

Наибольших значений достигают приливные течения. Максимальные их скорости имеют порядок м/с. Вызвано это тем, что приливообразующие силы приводят в движение всю толщу воды, которая, приходя на мелководье и в узкие проливы, в полном соответствии с законами гидродинамики резко ускоряется: чем меньше сечение, тем выше скорость потока. Но в открытом океане, вдали от берегов, скорости приливных течений сравнительно невелики и составляют несколько десятков см/с [Прошутинский, 1993].

Отдельно следует сказать о нагонных течениях, которые возникают при образовании анемобарических волн в атмосфере. Они не периодичны и зависят от образования и перемещения крупных барических образований, таких как циклоны и антициклоны. Скорости их изменяются в большом диапазоне от нескольких см/с до десятков см/с и более 1 м/с в прибрежной зоне и устьевых областях.

Течения могут, и так часто бывает, накладываться друг на друга на одной акватории. Тогда возникает сложная картина с образующимися локальными циркуляциями и круговоротами. Скорости течений при этом могут достигать 2-3 м/с, а на некоторых участках и более.

В *Белом* море преобладают приливные течения. В большинстве своём они носят правильный полусуточный характер. Наибольших значений они достигают в северной части моря – более 250 см/с. Также больших значений они достигают в Онежском заливе – до 100 см/с. Скорости остальных течений по сравнению с приливыми невелики и не превышают 30-40 см/с.

В *Баренцевом* море поверхностные течения направлены с юго-запада на восток, далее на юг (в Белое море) и север, образуя круговорот против часовой стрелки. Из Белого и Карского морей в Баренцево море также направлены течения Беломорское и Литке соответственно. Скорости этих и других течений варьируются в широком диапазоне от 5 до 50 см/с.

Приливные течения так же, как и в Белом море, носят полусуточный характер, однако скорости их существенно ниже и не превосходят 150 см/с в прибрежной зоне. В проливах, связывающих крупные заливы с акваторией моря, а также в некоторых фиордах Кольского полуострова и Новой Земли скорости приливных течений могут возрастать более чем в два раза. К такому же эффекту приводит наложение штормового нагона на однонаправленное приливное течение, особенно в юго-восточной части моря.

В целом же циркуляцию вод в Баренцевом море нельзя назвать устойчивой. Она подвержена сильным изменениям вследствие высокой интенсивности синоптических процессов и сезонных гидрологических явлений.

В *Карском* море циркуляция вод относительно устойчива. Характерной чертой картины течений является циклонический круговорот в юго-западной части и разнонаправленные потоки в остальных районах. Скорости поверхностных и приливных течений одного порядка и не превышают нескольких десятков см/с.

В море *Лантевых*, как и в других арктических морях, циркуляция носит циклонический характер – течения образуют круговорот против часовой стрелки. Скорости всех видов течений, включая приливные, которые являются неправильными полусуточными, невелики и в большинстве случаев не превышают нескольких см/с.

В *Восточно-Сибирском* море скорости течений также невелики. Прилив правильный полусуточный. Циклоничность циркуляции проявляется слабо.

В *Чукотском* море скорости течений заметно возрастают. Скорости постоянных течений равны от 30 до 50 см/с, а в Беринговом проливе, соединяющем два океана, и того больше: при сопутствующих ветрах они возрастают до 150 см/с. Приливные течения существенно меньше – 10-20 см/с и только в некоторых местах возрастают до 70-80 см/с.

*Колебания уровня.* Уровень океана и морей связан напрямую с течениями, которые перемещают водные массы по акватории, а также с атмосферным давлением прямо, когда столб атмосферного воздуха непосредственно давит на водную поверхность, и косвенно, когда перемещение барических образований вызывает ветровые течения и длинные волны. Поскольку указанные процессы являются высоко динамичными, колебания уровня в СЛО и его морях имеют высокую амплитуду и пространственно-временную изменчивость.

В открытом океане и удалённых от берега акваториях морей колебания уровня выражены слабо, в то время как на мелководьях, и особенно в прибрежной зоне, амплитуда колебаний может достигать нескольких метров. При этом под амплитудой колебаний понимают не расстояние между средним уровнем и точками минимума и максимума, как в теории волн, а размах колебаний, равный величине разности между экстремумами. Наибольшее влияние на уровень оказывают приливы и штормовые нагоны и сгоны. Колебания, обусловленные другими причинами, на порядок, а то и на два меньше.

В *Баренцевом* море наибольшие колебания имеют место вдоль Кольского полуострова – до 3 м, на юго-востоке – 2,5 м, у Шпицбергена – порядка 1 м. В Баренцевом море колебания уровня имеют одну особенность: выраженный сезонный ход. Разница между минимумом и максимумом сезонных колебаний может достигать половины метра.

В *Белом* море, из-за его своеобразной конфигурации, колебания уровня одни из самых высоких в Мировом океане. В Мезенском заливе, Воронке и частично в Горле амплитуда приливных колебаний может превосходить 7 м. Значительной высоты также достигают приливы в вершине Кандалакшского залива – порядка 3 м. Сгонно-нагонные колебания уровня заметно меньше, и их амплитуда не превышает полутора-двух метров.

В *Карском* море приливы сравнительно невелики и не превосходят 0,5-0,8 м, и только в Обской губе достигают 1 м. Сгонно-нагонные колебания уровня имеют более высокую амплитуду и в некоторых заливах могут превышать 2 м.

В море *Лаптевых* приливные колебания уровня невелики – около 0,5 м, и только в Хатангском заливе они достигают 2 м. В этом заливе приливная волна проникает далее в р. Хатанга и распространяется вверх по течению на 500 км – уникальный случай в природе. Существенно выше сгонно-нагонные колебания уровня, размах которых достигает 2 м, а в бухте Тикси и того более – 2,5 м. Сезонные колебания уровня сопоставимы с приливными и имеют амплитуду 0,4 м.

В *Восточно-Сибирском* море приливные колебания уровня в общем невелики и не превышают 25 см в прибрежной зоне. Сезонные колебания из-за большой роли речного стока заметны, и разница между июнем (максимум) и августом (минимум) достигает 70 см, а зимой снижается ещё больше. Такой же порядок имеют и сгонно-нагонные колебания. Только в устье р. Колыма и в проливе Дмитрия Лаптева они имеют максимум, равный 2,5 м. Характерной чертой колебаний уровня в Восточно-Сибирском море является его резкая смена положения в прибрежной зоне.

В *Чукотском* море вдоль всего побережья величина прилива незначительна – 10-15 см, лишь на о. Врангеля приливы достигают величины 1,5 м. Сгонно-нагонные колебания не превышают 60 см.

*Волнение.* Главной волнообразующей силой является ветер: чем он сильнее и длительнее, тем выше и длиннее волны. Волнение распространяется на акватории и после прекращения действия ветра. Такие волны называются зыбью, и они могут проходить сотни километров. На мелководье волны трансформируются вплоть до полного разрушения. В прибрежной зоне волны могут генерировать так называемые разрывные течения, которые, хотя и носят локальный характер – порядка десятков и сотен метров, достигают значительных скоростей до 1 м/с, являясь причиной перемещения наносов и размыва берегов.

В *Баренцевом* море благоприятны условия для развития ветрового волнения и зыби. Большие пространства открытой воды и высокая повторяемость штормов приводят к тому, что в длитель-

ных, не менее суток, и сильных, со скоростью ветра более 25 м/с штормах волны достигают высоты более 10 м.

В Белом море на развитие волн большое влияние оказывают течения, способные существенно изменять форму и высоту волн [Лавренов, 1998]. Поэтому, несмотря на относительно небольшие размеры моря, их высота при северных ветрах и встречных течениях в северной части моря может превышать, как и в Баренцевом море, более 10 м [Коробов, 1991].

В Карском море высокие волны образуются только в малоледные годы. При сильных штормах волны могут достигать 8 м. Ещё меньше волнение в море Лаптевых, которое редко превосходит значения в 7 м. В Восточно-Сибирском море максимальные волны достигают высоты 5 м. При этом центральные районы моря считаются относительно спокойными. В Чукотском море волнение относительно невелико: волны не развиваются выше 4-5 м, в экстремальных штормах – 7 м.

*Гидрохимия.* Гидрохимический режим арктических морей, если говорить в целом, изучен недостаточно. В меньшей степени это относится к акваториям Баренцева и Белого морей и южной части Карского моря. Остальные же моря российской Арктики исследованы хуже. Объясняется это как недостаточным числом экспедиций, в том числе и в советский период, так и относительно редкой сетью гидрологических станций, на которых производится отбор проб на химические анализы. Немалую роль на отбор проб оказывает наличие постоянного ледяного покрова, закрывающего для свободного доступа огромные участки акваторий в восточном секторе Арктики. Наиболее изучен растворённый кислород, солевой состав, показатель рН и биогенные элементы (фосфаты и растворённый кремний). В то же время такие важные элементы, как нитраты, карбонаты, металлы и др. изучены слабо.

Гидрохимический режим морей российской Арктики имеет много общих черт. Различия обусловлены влиянием смежных акваторий – Атлантического и Тихого океанов – и речным стоком, поскольку химический состав речных вод во многом зависит от региональных условий. Влияние атлантических вод прослеживается вплоть до моря Лаптевых, тихоокеанских – в Чукотском и Восточно-Сибирском морях. Речной сток на гидрохимический режим наибольшее влияние оказывает в Белом, Карском морях и море Лаптевых.

Поскольку растворённые химические вещества в морских водах непосредственно не оказывает никакого влияния на транспортную инфраструктуру, остановимся только на ключевых элементах.

На насыщение кислорода наибольшее влияние оказывает температура воды, обмен с атмосферой, фотосинтез и речной сток. При этом чем ниже температура, тем выше значения растворённого кислорода. В поверхностном слое из-за постоянно низких вод насыщенность кислорода достаточно высока и соответствует наибольшему насыщению. Летом вследствие активного развития фитопланктона кислород может достигать пресыщения, причём значительно – до 17%. В то же время речной сток может повлиять на величину насыщения в обратную сторону, вызывая падения до 40% от величины насыщения. С глубиной содержание кислорода в воде уменьшается и достигает минимума на глубинах нескольких десятков метров.

Углерод, наряду с водородом и кислородом, играет ключевую роль в жизни на Земле. От круговорота содержащих углерод соединений также зависят многие природные циклы планетарного масштаба – изменения климата, осаждения карбонатов, объёма биомассы и др.

Наибольшие значения водородного показателя рН, характеризующего состояние карбонатной системы, наблюдаются на поверхности. По пространству рН изменяется в достаточно широком диапазоне: от 7,70 в приустьевых областях Карского моря и моря Лаптевых до 8,50 в Чукотском море, когда наблюдается пик цветения фитопланктона.

Насыщенность океанских вод карбонатом кальция редко достигает величины 100% как на поверхности, так и на глубинах. Несколько более высокие концентрации отмечаются в западном секторе, что связано с притоком вод из Атлантики. Что касается такого показателя как *щёлочность*, то она изменяется незначительно.

Концентрации *биогенных элементов* в СЛЮ и его морях колеблются в обширном диапазоне. Наименьшее их количество содержится в поверхностных водах приатлантической области Арктического бассейна, в то время как в притихоокеанской части они в полтора-два раза выше. В центральной части в отдельные годы наблюдается подъём глубинных вод, что приводит к увеличению концентраций биогенных элементов в несколько раз.

Несколько слов необходимо сказать о растворимости в морских водах метана. Эта проблема стала всерьёз обсуждаться в научных кругах буквально в последние годы, когда были обнаружены многочисленные места аномальной эмиссии на арктическом шельфе [Лобковский, Никифоров, 2013].

Потепление верхней толщи осадочного слоя и образование разломов в земной коре приводят как к переходу метана из газогидратов в газообразное состояние, так и непосредственному его выходу на поверхность из недр нефтегазоносных бассейнов по разломам. Метан – сильный парниковый газ. Поступление его в больших количествах в атмосферу благоприятствует повышению её температуры и сдвигу в протекании криологических процессов (таяние льдов), биологических (нарушение природных циклов), развитию опасных геологических явлений. Это дало основание выделить данный фактор как влияющий на безопасность мореплавания и разработку источников минеральных ресурсов на шельфе СЛО [Никифоров, Лобковский, Дмитревский, Ананьев, Сорохтин, Хортов, Богданова, 2016].

*Гидробиология.* В биологическом плане акватория СЛО изучена всё ещё недостаточно, особенно по сравнению с морями умеренных и южных широт. Причина здесь очевидна: суровые природные условия. Однако общие характеристики растительного и животного мира этого региона достаточно хорошо известны. По пока ещё не окончательным подсчётам, [Северный Ледовитый и Южный океаны..., 1985] «флора и фауна Северного Ледовитого океана состоит более чем из 3000 видов, относящихся примерно к 1200 родам и 430 семействам, и включает все известные типы, около 90 % классов, 60 % отрядов, 30% семейств, 20% родов и 0,1-4% видов, населяющих воды Мирового океана». Поскольку его видовой состав сформировался относительно недавно и позже сопредельных акваторий, то эндемизм относительно невелик и, по данным того же источника, представлен 36 родами (3%) и 540 видами (18%).

В целом флора и фауна СЛО считается достаточно бедной для морской среды. Однако не все моря российской Арктики можно охарактеризовать таким образом. Видовой состав и биомасса изменяются с запада на восток в большом диапазоне. Качественное разнообразие постепенно уменьшается от Баренцева к Чукотско-

му морю с 2000 до 900 видов у бентосных организмов и с 850 до 400 видов у планктонных. Для некоторых видов заметны сезонные колебания численности, что очевидно.

Рассмотрим ключевые моменты растительного и животного мира СЛО и его морей. Особенности флоры и фауны является гигантизм (например, мидии) и более высокая продолжительность жизни некоторых видов (например, некоторые виды рыб).

Распределение планктона в морских и распреснённых прибрежных водах весьма неоднородно и зависит от многих факторов, в том числе и сезонных. Стандартной величиной биомассы фитопланктона являются её значения в диапазоне 0,2-0,6 г/м<sup>2</sup>. Максимальные значения, превышающие 10 г/м<sup>2</sup>, достигаются в весенне-летний период в Баренцевом и Белом морях в фотическом слое. Зоопланктон распределен по акватории более равномерно, но и здесь отмечается его некоторое снижение с запада на восток. Обычная плотность – несколько тысяч экземпляров на 1 м<sup>2</sup>.

Численность организмов, обитающих на грунте и в грунте, существенно снижается с запада на восток. Особенно заметно это по крупным формам (более 1 мм), составляющим основной объём биомассы. В Баренцевом и Белом морях насчитывает до 1800 видов при биомассе от 100 до 350 г/м<sup>2</sup>, что сопоставимо с северными и даже умеренными акваториями Атлантического океана. В море Лаптевых количество видов уже снижается до 500-600 при средней биомассе всего 25 г/м<sup>2</sup>.

Насчитывается немногим более 100 видов рыб. Многие из них носят промысловый характер: сельдь, треска, камбала и ряд других. Видовое разнообразие уменьшается с запада на восток, что связано с понижением температуры. Орнитофауна насчитывает около 30 видов – чайка, гага, кайра, гуси и др. Они ведут преимущественно колониальный образ жизни, образуя гигантские базары на побережьях островов.

Морские млекопитающие представлены типичными арктическими видами – моржами, тюленями, китами.

*Ледяной покров.* Большую часть года основная часть акватории покрыта льдом. Не замерзает, да и то не каждый год, только юго-западная часть Баренцева моря, находящаяся под обогревающим воздействием морских и воздушных атлантических масс.

В последние годы многими источниками отмечается уменьшение площади льдов всего океана, что связывают с потеплением климата. Этот факт большинством авторов [Оганесян, 2019] оценивается как благоприятный для мореплавания. Однако всё не столь очевидно: лёд, откалываясь от тающих полей, забивает проливы и, находясь под приливным и ветровым сжатием, препятствует проходу через них. Известны случаи, когда в августе прохода Карскими Воротами приходилось ожидать несколько суток.

В Северном Ледовитом океане и его морях встречаются все виды льдов от молодых до многолетних, проявляющихся в разных формах: припайные, плавучие, в виде ледяных образований.

*Баренцево море* – единственное арктическое море, которое, как отмечено выше, редко замерзает полностью. На большей части замерзающей акватории образуются только однолетние льды; многолетние льды встречаются на самом севере, куда они выносятся течениями из Карского моря. Ледообразование начинается в сентябре – на севере и заканчивается в ноябре – в юго-восточной части моря. Таяние льдов происходит с мая по август. Преобладают плавучие льды, среди которых встречаются относительно небольшие айсберги – 25 м в высоту и 600 м в длину. В юго-восточной части моря образуется припай, распространяющийся до изобаты 10 м. Небольшой припай образуется и в заливах Кольского полуострова. Максимального покрытия – до 75% площади моря – достигается в апреле. Ледовитость моря сильно варьируется из года в год, что связано с колебаниями мощности тёплого Нордкапского течения и вариациями климата. Поскольку лёд в большинстве своём однолетний, толщина его обычно не превышает 1 м.

На образование ледяного покрова *Белого моря* большое влияние оказывают динамические факторы – сильные течения и большие колебания уровня, препятствующие формированию льдов. Начинается ледообразование в устьевых областях на севере моря в октябре месяце и заканчивается также на севере в январе. Полностью очищается ото льда море в мае-июне. Припай небольшой, редко превышает ширину 1 км. Толщина льда также невелика и обычно составляет 30-40 см, но в суровые зимы может достигать полутора метров. В море образуются только однолетние льды; занос на его акваторию многолетних льдов из других морей исключён. Из-за сильных приливов в узкой северной части моря нередко

происходит сжатие ледяных полей, препятствующее судоходству: пробитые ледоколами каналы тут же закрываются льдом.

Замерзание *Карского* моря начинается на севере в сентябре, и через месяц вся его акватория уже полностью покрывается льдом. Очищение ото льда происходит с июня по август, но полностью ледяной покров не тает никогда, в связи с чем в Карском море образуются многолетние льды. В прибрежной зоне вдоль всего побережья формируется припай. Летом он взламывается, и образующиеся ледяные поля долгое время сохраняются в виде так называемого Североземельского массива, препятствующего плаванию судов. За полосой припая располагается полоса чистой воды, по которой могут плавать молодые льды. Эти участки называются заприпайными полыньями. По ним осуществляется судоходство. В центральной части моря распространены дрейфующие льды, преимущественно однолетние. Толщина их достигает 2 м. На юго-западе моря из них образуется Новоземельский ледяной массив, особенностью которого является таяние льдов в летний период, а не вынос их в другие акватории. На севере моря лёд тает очень медленно, вследствие чего образуются мощные поля многолетних льдов.

Море *Лантевых* также большую часть года – с октября по май – покрыто льдом. Особенностью ледового режима этого моря является образование в восточной части мощного припая толщиной до 2 м. При этом он распространяется до изобаты 25 м, что, учитывая распространённость малых глубин, приводит к покрытию припаем до 30% площади моря. Зато в западной части моря припай занимает весьма узкую полосу, а в иные зимы не образуется совсем. Из-за постоянного выноса льдов из центральной части моря на север за кромкой припая постоянно образуются обширные полыньи и участки молодого льда шириной от десятков до сотен километров. Севернее полуострова Таймыр формируется ледовый массив, нередко сохраняющийся в течение всего года. В нём присутствуют многолетние льды.

Самое ледовитое море Российской Арктики – *Восточно-Сибирское*. Его акватория частично открывается ото льда всего на два-три месяца в году, с середины лета по сентябрь – начало октября. В отличие от других арктических морей, в Восточно-Сибирском море преобладает принос льдов, главным образом из Арктическо-

го бассейна, что, собственно, и обуславливает его более высокую ледовитость. В западной части моря образуется обширный припай шириной 400-500 км, смыкающийся с припаем моря Лаптевых. В центральной и восточной части моря ширина припая не такая большая, она постепенно уменьшается до нескольких десятков километров. Толщина припайных льдов возрастает с востока на запад, достигая величины 2 м. Непосредственно за границей припая находится зона достаточно мощных однолетних и двухлетних дрейфующих льдов толщиной 2-3 м. Во время сильных и устойчивых южных ветров они могут относиться к северу. На их месте образуются обширные полыньи. Так же, как и в Карском море, и море Лаптевых, в западной части Восточно-Сибирского моря на месте разрушенного припая летом формируется ледовый массив, получивший название Новосибирского, который только к концу лета прекращает своё существование.

В *Чукотском* море ледовая обстановка становится более лёгкой. Ледяной покров устанавливается с ноября по июнь. Большого припая не образуется – наибольшая его ширина обычно не превышает 20 км. Толщина плавучих льдов редко превышает 2 м. В Чукотском море также образуются очень протяженные заприпайные полыньи и ледовые массивы. На севере встречаются тяжёлые многолетние льды.

## Глава 6

### Экологическая ситуация

Экологическая ситуация самым непосредственным образом оказывает влияние на все отрасли экономики и тем самым заставляет учитывать состояние природной среды при разработке математических моделей социально-экономических систем, в том числе и транспортных задач [Ассаул, Погодин, 2019]. Под экологической ситуацией понимается широкий спектр вопросов: источники воздействия на окружающую среду, уровень загрязнения воздуха, территорий и акваторий, степень нарушенности ландшафтов, наличие особо охраняемых территорий, ограничения на хозяйственную деятельность. В такой последовательности мы их и рассмотрим.

*Источники воздействия.* Источники воздействия на природную среду АЗРФ по их расположению можно разделить на три категории: собственные, внешние и периодические. Собственные источники находятся непосредственно на территории и акватории Арктической зоны. К ним в первую очередь относятся: предприятия тяжёлой промышленности – цветной металлургии (Норильск, Печенга), целлюлозно-бумажной (Архангельск), топливной (ТЭЦ и месторождения нефтяных углеводородов, ВПК – атомное судостроение (Северодвинск), ЖКХ – все населённые пункты, сельское хозяйство – оленеводство.

Внешние источники воздействия располагаются как у границы арктической зоны, так и вдалеке от неё. Они принадлежат тем же отраслям экономики, что и внутренние источники воздействия. Их воздействие обусловлено переносом загрязняющих веществ водной средой и атмосферным воздухом. Особо в этом смысле стоит космодром Плесецк. Траектории пусков летательных аппаратов проходят через территорию АЗРФ, что приводит к её загрязнению падающими ступенями ракет и остатками не полностью сгоревшего топлива.

К периодическим источникам воздействия, как это следует из их названия, относятся временно находящиеся на территории АЗРФ объекты воздействия. Это, прежде всего, транспортные средства, различные экспедиции и изыскательские партии, промысловые бригады и, в некоторой степени, туристы.

По продолжительности действия источники делятся на стационарные и временные. Стационарные источники воздействуют постоянно. К ним относятся промышленные предприятия, населённые пункты, объекты инфраструктуры. К временным источникам относятся как периодически и случайно попадающие на данную территорию, так и работающие в сезонном режиме, например, сельское хозяйство, хотя последнее утверждение и не бесспорно, поскольку повторяется ежегодно в течение длительного времени.

*Характер воздействия.* Наиболее существенным видом загрязнения, и не только на Севере и в Арктике, является химическое загрязнение. Обусловлено это тем, что химические вещества, попадая в природную среду в концентрациях, превышающие фоновые, оказывают отравляющее влияние на объекты растительного

и животного мира. Особую опасность представляют соединения, искусственно синтезированные человеком, такие как пестициды и множество других, к которым в процессе эволюции у растений и животных не выработалась адаптация. Многие из них также имеют свойство накапливаться в трофической цепи, в конечном итоге оказывая негативное влияние на здоровье человека.

Причиной механического загрязнения является строительный и бытовой мусор. Образуется он вблизи населённых пунктов и в местах строительства зданий, сооружений и объектов транспортной инфраструктуры. Непосредственно этот вид загрязнения не оказывает существенного влияния на человека, только косвенно, становясь причиной вторичного загрязнения природной среды.

Шумовое загрязнение происходит вследствие работы предприятий и транспортных средств. Оно оказывает негативное воздействие на человека и животный мир.

Биологическое загрязнение имеет место при случайном попадании животных из других регионов, непродуманной акклиматизации не характерных для данной местности видов диких и одичавших домашних животных.

Другие виды загрязнения – радиационное, физическое и световое – вследствие принятия специальных мер защиты для АЗРФ мало характерны.

В окружающую среду загрязняющие вещества попадают в результате выбросов в атмосферу, сбросов в водные объекты и на земную поверхность. Механическое разрушение многолетне-мёрзлых пород, следствием которого становятся вскрытие скотомогильников, также является причиной биологического загрязнения.

*Уровень загрязнения воздуха.* Если в качестве показателя учитывать количество случаев превышения ПДК, то уровень загрязнения воздуха в Арктике будет выше, чем в среднем по России [Агбалян, 2011]. Однако вряд ли этот вывод стоит распространять на всю Арктику. Атмосфера – чрезвычайно подвижная среда, а в высоких широтах – в особенности. Постоянный сильный ветер создаёт благоприятные условия для рассеивания примесей, очень быстро понижая концентрации загрязняющих веществ в местах их выбросов. Но, с другой стороны, эти же процессы благоприятствуют распространению загрязнителей и пыли на большие рас-

стояния – так называемый дальний перенос. Вследствие дальнего переноса загрязнения, органические и минеральные вещества могут переноситься на сотни и тысячи километров как в пределах Арктики, так и от источников, расположенных вдалеке от неё [Шевченко и др., 2010]. При этом ожидается тенденция к усилению загрязнения вследствие этих процессов в 2020-2050 гг. [Макоско, Матишева, 2017]. Вызывает опасность распространение таких опасных загрязнителей, как тяжёлые металлы, которые затем оседают на земной поверхности и водной акватории, накапливаясь в донных отложениях [Виноградова, Котова, 2016, Виноградова, Котова, Топчая, 2017].

*Уровень загрязнения территорий.* Основное загрязнение почв и грунтов происходит оставленной тарой от ГСМ, несанкционированных свалок бытовых отходов, осаждения поллютантов из атмосферы и вследствие нефтяных разливов. Наличие большого количества бочек на гидрометеорологических станциях и объектах Министерства обороны и пограничных заставах – по разным оценкам в Арктике их насчитывается несколько миллионов – вызвано нерентабельностью их вывоза. Ржавая, бочки становятся источником попадания железа в природную среду, но это загрязнение носит локальный характер.

В целом же содержание тяжёлых металлов в почвах пока не вызывает особого беспокойства [Вишневая, Попова, 2016], но они имеют свойство накапливаться в растениях. Сильное накопление отмечено для мышьяка, хрома и кобальта, среднее – для меди, никеля и стронция и слабое – для цинка и молибдена [Попова, 2016].

Свалки бытовых отходов представляют угрозу близлежащим территориям вследствие загрязнения почв и грунтовых вод в тёплый период. Они могут представлять серьёзную угрозу для питьевого водоснабжения в случае попадания загрязнённых вод в водоносные горизонты.

Нефтяное загрязнение в настоящий момент не приводит к серьёзным последствиям: результаты обследований показывают наличие локальных участков загрязнения на буровых, а математическое моделирование для аварийных разливов на тундровых грунтах для наиболее вероятных объёмов показало, что радиус загрязнения не превышает несколько десятков метров [Губайдуллин, Лохов, Коробов, Тарасова, 2016].

*Уровень загрязнения морских акваторий и поверхностных вод.* Как свидетельствуют данные о химическом составе морских вод, их состояние довольно стабильно. Нефтяное загрязнение морских акваторий, несмотря на вынос нефтепродуктов реками, добычу на море и в прибрежной зоне, а также транспортировку нефтяных углеводородов танкерами и трубопроводами, проложенными по морскому дну, невелико. По данным многолетних наблюдений [Немировская, Реджепова, Трубкин, 2018], установлено, что в Белом, Карском, Лаптевых и Восточно-Сибирском морях нефтяное загрязнение носит в основном локальный характер и его воздействие на морскую биоту невелико [Мискевич, Коробов, Губайдуллин, 2014]. При этом в устьевых областях рек, в зоне смешения речных и морских вод, происходит резкое снижение концентраций нефтяных углеводородов.

В последние годы внимание мирового сообщества обращено на загрязнение природной среды пластиком. Достигло оно и Арктики. Сам этот факт установлен давно, но специальные исследования в Баренцевом море, выполненные в 2011-2016 гг., [Иванова, Соколов, Харитоновна, 2018] показали, что на самой акватории моря, побережье и островах имеет место тенденция к увеличению объёма пластикового мусора.

*Степень нарушенности ландшафтов.* В Арктике нарушенных ландшафтов немного, что вызвано малой плотностью населённых пунктов. Однако их число возрастает на юге АЗРФ, особенно вокруг городов. Это карьеры, траншеи, отвалы и свалки. К нарушенным ландшафтам также относятся брошенные сельхозугодья и вырубленные участки лесов. На них происходит замещение первоначальной растительности другими видами. Площадь таких ландшафтов трудно поддаётся количественному учёту, но защитные механизмы природы во многом восстанавливают нанесённый человеком ущерб.

*Наличие особо охраняемых природных территорий (ООПТ).* Особо охраняемые природные территории – это «участки земли, водной поверхности и воздушного пространства над ними, где располагаются природные комплексы и объекты, которые имеют особое природоохранное, научное, культурное, эстетическое, рекреационное и оздоровительное значение, которые изъяты решени-

ями органов государственной власти полностью или частично из хозяйственного использования и для которых установлен режим особой охраны» [Федеральный закон от 14 марта 1995 г. № 33-ФЗ «Об особо охраняемых природных территориях»]. Полное или даже частичное изъятие территорий и акваторий из хозяйственной деятельности создаёт серьёзное ограничение на создание объектов транспортной инфраструктуры и осуществление логистических операций [Коробов, 2004]. Этим создаётся дискретная пространственная структура территорий (причём не только на Севере) [Кочуров, Турекешев, 2014; Кочуров, Радионов, 2014], существенным образом осложняющая выбор оптимальных маршрутов транспортировки грузов и выгрузки их на берег.

ООПТ бывают нескольких категорий:

- а) государственные природные заповедники, в том числе биосферные заповедники;
- б) национальные парки;
- в) природные парки;
- г) государственные природные заказники;
- д) памятники природы;
- е) дендрологические парки и ботанические сады.

В зависимости от категории ООПТ, ограничения на хозяйственную деятельность могут быть полными или частичными. Но даже частичные ограничения требуют времени на разработку соответствующих мероприятий природоохранного характера.

В АЗРФ присутствуют все категории ООПТ. В настоящей работе мы не ставим целью их изучение с учётом того, что не все субъекты РФ входят в состав Арктической зоны полностью, это требует проведения специальных исследований, выходящих за рамки данной монографии. Для нас достаточно самого факта их существования, что необходимо для корректного генерирования маршрутов транспортировки и учёта этого фактора в математических моделях. Поэтому ограничимся самыми общими сведениями.

В составе субъектов РФ, входящих в состав АЗРФ, насчитывается (рис 6.1.) несколько десятков заповедников и национальных парков и большое количество других ООПТ федерального и регионального значения [Стишов, 2013]. Площадь только заповедников, национальных парков и заказников в Арктике равна 321,8 тыс. кв. км [<https://ria.ru/20111226/527007298.html>] – более половины

всей площади ООПТ России, что немногим меньше территории Германии – далеко не самой маленькой европейской страны.

Кроме того, вокруг ООПТ устанавливаются охранные зоны, в которых также вводится режим ограниченного природопользования. Площадь их не учитывается при подсчёте площади ООПТ, даже если она очень велика, но этот факт также необходимо принимать во внимание при планировании хозяйственной деятельности.

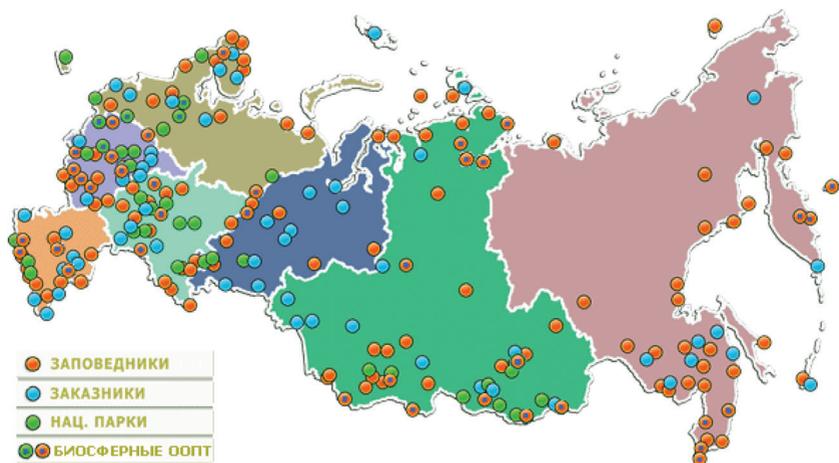


Рис. 6.1. Особо охраняемые территории Российской Федерации (<http://oopt.info>)

*Ограничения (животный и растительный мир).* ООПТ являются не единственными природными факторами, обусловленными объектами животного мира, которые ограничивают транспортные операции в море и выгрузку на берег. К аналогичным ограничениям относятся также акватории и территории, подпадающие под различные конвенции. Самой известной из них является, пожалуй, Рамсарская Конвенция о водно-болотных угодьях, имеющих международное значение, главным образом, из-за наличия местобитаний водоплавающих птиц, принятая 2 февраля 1971 года в г. Рамсар (Иран). Под её действие попадают и морские акватории, например, Кандалакшский залив Белого моря. В них также установлен режим ограниченного природопользования.

Отметим, что, помимо оговорённых законом «Об особо охраняемых природных территориях» категорий ООПТ, законодательство Российской Федерации может разрешать создание других охраняемых территорий, рангом ниже.

При планировании работ в прибрежной зоне арктических морей необходимо принимать во внимание места обитания птиц и морских млекопитающих. Резкие сигналы от судов и работы двигателей от низко летящих вертолётов могут спровоцировать панику на птичьих базарах и лежбищах, следствием которой становятся разбитые кладки и гибель молодых и слабых особей моржей и тюленей, задавленных во время бегства стада с берега или льдин в воду. Места таких обитаний либо стационарны, либо периодичны в определённые сезоны, что упрощает их учёт при планировании трасс и мест выгрузки.

В целом же экологическую ситуацию в АЗРФ нельзя назвать острой. Имеются локальные зоны загрязнений и нарушений территорий непосредственно вблизи источников воздействия. Экстремальные же ситуации отмечаются крайне редко [Котова, Коробов, Павленко, 2018].

## Часть 3

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ**

На логистические операции оказывают влияние большое количество факторов: экономических, социальных, геополитических и природно-экологических. Учесть их в задачах принятия решения достаточно сложно, поскольку они в различных ситуациях проявляются различно. Поэтому такого рода задачи относятся к классу проблем, не имеющих точного решения.

На практике в этих целях широко применяется имитационное моделирование. Подходы к составлению и реализации моделей могут быть самые разные, как и используемые типы самих моделей. В этой части монографии мы рассмотрим наиболее общие подходы к составлению логистических моделей, и проблемы, связанные с их реализацией. При этом будет принято во внимание, каким образом эти модели вписываются в концепцию «Интернета вещей», становящейся в настоящее время новой научной парадигмой, приходящей на смену парадигме информационного общества.

## Глава 7

### **Ограничения на стандартные модели**

Применение стандартных подходов к моделированию логистических систем в АЗРФ сталкивается с рядом методологических трудностей, обусловленных необходимостью в обязательном порядке учитывать особенности природных и экономических условий Арктики [Тутыгин, Коробов, Чижова, Антипов, 2019].

При планировании доставки грузов в Арктику морским путём возникает ряд дополнительных проблем, связанных с выбором места их выгрузки на берег. Обусловлено это как неразвитостью соответствующей инфраструктуры, так и необходимостью доставки грузов заказчикам – геологам, нефтяникам, на гидрометеорологи-

ческие станции, военным, пограничникам и другим заказчикам, в места, удалённые от каких-либо портов и портопунктов.

С учётом этого рассмотрим наиболее важные из факторов, которые, на наш взгляд, необходимо учитывать при разработке математических моделей логистических операций в Арктике [Тутыгин, Коробов, 2017].

*Первой* проблемой является ограниченность сроков проведения логистических операций в короткий период летне-осенней навигации, когда становятся проходимыми Новоземельские проливы и пролив Вилькицкого. В зимне-весенний период проходы через эти проливы в связи с высокой плотностью льда по фарватеру не представляются возможными без ледокольной проводки, что является существенным препятствием для навигации из западного сектора Арктики в восточную часть и в обратном направлении [Wang, Yuan, Ting, Li, 2016].

*Вторая* проблема обусловлена сложными условиями и способами всех видов выгрузки: вертолетной, путем распаковки, прокладки шланголиний для наливных грузов и швартовки к причалу. Как показывает практика, в большинстве случаев возможна только вертолетная выгрузка, особенно на необорудованный берег. Из-за этого стоимость выгрузки, когда судно стоит на якоре или дрейфует, по сравнению с портовыми работами, существенно возрастает как вследствие значительного увеличения времени на перегрузку на малые плавсредства, так и высокой стоимости аренды вертолётов.

*Третья* проблема – удаленность точек выгрузки и доставки людей от материковых инфраструктур, поскольку на всю Арктику насчитывается всего чуть более десятка портов и портопунктов, что крайне недостаточно для такой акватории. Во многих случаях действующие порты, портопункты, аэродромы и терминалы используются как промежуточные площадки для перевалки грузов. Помимо потерь времени на перегрузку, это влечёт за собой дополнительные расходы на строительство и содержание складских помещений, специальной техники и гостиниц, а также на такелажные работы. В случае же возникновения чрезвычайных ситуаций, например, экстренной доставки топлива и эвакуации людей, по правилам безопасности полётов приходится отправлять одновременно два вертолета с несколькими приземлениями для отдыха экипажа и дозаправки.

*Четвёртая* проблема возникает при выгрузке крупнотоннажных монолитных грузов на берег. Вертолёты, базирующиеся на борту судов, как правило, не могут брать на подвеску более двух тонн. Использование более мощных вертолётов в принципе возможно, но связано с дополнительными затратами на их эксплуатацию и особенно на оплату перелёта от мест постоянного базирования к месту работ.

Из-за чего возникает эта проблема? Выгрузке с моря препятствуют абразионные, т.е. разрушающиеся, заболоченные и крутые берега, совокупная протяжённость которых в Арктике составляет тысячи километров [Каплин, Леонтьев, Лукьянов, Никифоров, 1991]. Заболоченные участки могут занимать десятки километров как по протяженности, так и по ширине прибрежной полосы. Для преодоления такого рода препятствий требуется укрепление берегов, строительство специальных дорог и подъёмников. Всё это занимает достаточно много времени, не говоря уж о дополнительных затратах на инженерные изыскания, проектирование, строительство и эксплуатацию.

Одним из выходов из такой ситуации является возможность в конце зимы – в марте-апреле – в тех местах, где образуется прочный припай, производить выгрузку грузов прямо на лёд и доставку грузов с судов на берег по специально оборудованным дорогам. Соответствующие технологии разработаны ещё в семидесятые годы прошлого века и прошли успешную апробацию на Варандее и Харасавее. Но эти операции ограничены во времени, целесообразны только для больших объёмов и весьма затратны в финансовом отношении. Кроме того, они зависят от состояния ледяного покрова – припай может не образоваться или же его может оторвать – и поэтому возможны не в каждую навигацию.

Также необходимо отметить, что для крупнотоннажных монолитных грузов, таких как энергоблоки, требуются специальные суда, которых может не оказаться в наличии, а для особо габаритных грузов их необходимо будет строить, поскольку большие баржи, используемые в этих целях на крупных реках, например, для перевозки турбин, по правилам Морского регистра, в морях эксплуатироваться не могут. Кроме того, будут необходимы и специальные краны для их выгрузки на берег, которые также придётся доставлять к местам выгрузки.

*Пятая* проблема – обеспечение безопасности транспортировки и выгрузки на берег наливных грузов, таких как нефть и нефтепродукты [Павленко, Муангу, Коробов, Лохов, 2015]. Они представляют собой серьёзную экологическую опасность при авариях на танкерах, разрыве трубопроводов и шланголиний, обрыве подвесок с бочками при их доставке вертолётами. Масштабы загрязнения морских акваторий могут достигать сотен квадратных километров [Губайдуллин, Ёстбёл, Золотухин и др, 2016], а на суше, даже при небольших разливах, – тысячи квадратных метров [Губайдуллин, Лохов, Коробов, Тарасова, 2016], на рекультивацию которых потребуются суммы, исчисляемые десятками миллионов рублей.

При этом возникает ещё далеко не полностью решённая проблема с размещением средств ликвидации аварийных разливов нефти [Nordam, Dunnebier, Beegle-Krause, Reed, Slagstad, 2017]. Места базирования таких пунктов находятся в портах. Для всего западного сектора Арктики – это Мурманск. В случае крупной аварии, например, на платформе «Приразломная» или на танкере в юго-восточной части Баренцева моря, не говоря уже о восточном секторе Арктики, собственных средств для локализации разлива и ликвидации нефтяного пятна будет явно недостаточно. Время же подхода специальных судов из Мурманска в эти районы составляет порядка двух суток. За это время пятно распространится на большую акваторию и вполне может достичь берегов, нанося огромный ущерб экосистеме и биоресурсам [Wein, Bliss, 1973].

*Шестая* проблема также носит экологический характер – наличие особо охраняемых природных территорий и временные ограничения на производство работ в некоторые периоды биологических циклов, имеющих важное значение для ряда животных [Юдахин, Губайдуллин, Коробов, 2002].

*Седьмая* проблема – острая нехватка ледоколов. На момент написания этой книги у Росатомфлота насчитывается два атомных ледокола с двухреакторной ядерной энергетической установкой («Ямал» и «50 лет Победы»), два ледокола с одnoreакторной установкой («Таймыр» и «Вайгач»), атомный лихтеровоз-контейнеровоз «Севморпуть» и порядка двух десятков дизельных ледоколов, работающих на всей акватории Северного Ледовитого океана и его морях [Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», 2017] (табл. 7.1).

Таблица 7.1

**Характеристики атомных ледоколов на трассе Севморпути**

Характеристики	Атомные ледоколы				
	«Ямал»	«50 лет Победы»	«Таймыр»	«Вайгач»	«Севморпуть»
Год ввода в эксплуатацию	1992 г.	2007 г.	1988 г.	1990 г.	1988 г.
Макс. длина, м	148,0	159,6	151,8	151,8	260,1
Макс. ширина, м	30,0	30,0	29,2	29,2	32,2
Водоизмещение, т	23 000	25 168	21 000	21 000	61 000
Пропульсивная мощность, МВт	54,0	54,0	35,0	35,0	32,5
Скорость хода, узлов	20,6	18,6	18,5	18,5	20,8
Автономность плавания, мес.	7,5	7,5	7,5	7,5	2,5
Ледопроездимость, м	2,0	2,8	1,77	1,77	1,5

Несмотря на то, что грузопоток по Севморпути в последние годы увеличивается (табл. 7.2), и это во многом благодаря ледокольному флоту, ледоколов сегодня явно недостаточно для проводки судов и обслуживания ледостойких буровых платформ и морских терминалов.

Таблица 7.2

**Грузопоток по Севморпути (по данным Росатомфлота)**

Годы	2006	2011	2013	2014	2015	2016
Грузопоток, млн т	2,0	3,1	3,9	4,0	5,4	7,5

Отсюда особенно актуальной является задача расстановки ледоколов на трассе Севморпути для повышения эффективности логистических операций. В отличие от известной задачи линейной расстановки флота [Володин, 1976], она имеет свои принципиальные особенности, вызванные, прежде всего, разнообразием факторов, влияющих на логистику Севморпути.

*Восьмая* проблема – моральный и физический износ грузовых судов и портовых сооружений. Так, научно-экспедиционному суду «Михаил Сомов», одному из основных судов, обеспечивающих северный завоз, более сорока лет. Такие суда уже не могут работать на полную мощность в течение всей навигации, а их постоянный ремонт требует значительных средств.

*Девятая* проблема – дефицит трудовых ресурсов. Последние два-три десятилетия наблюдается устойчивая тенденция оттока постоянно проживающего населения из регионов, входящих в зону АЗРФ. Чтобы не быть голословными, приведём некоторые статистические характеристики. По данным Росстата [Федеральная служба государственной статистики, 2017], приведенным в табл. 7.3, за период с 1991 по 2015 годы наибольший темп снижения (убыли) численности населения наблюдался в Чукотском автономном округе (68,6% или на 109,8 тыс. чел.), на втором месте по темпам сокращения численности населения среди регионов АЗРФ находилась Мурманская область (35,2% или на 414,8 тыс. чел.), третью позицию в этом рейтинге занимала Республика Коми (7% или 397,2 тыс. чел.).

Отметим, что единственным регионом Арктической зоны России, где за рассматриваемый период наблюдался прирост численности населения на 6,6%, или на 33,1 тыс. человек, являлся Ямало-Ненецкий автономный округ. В целом же по всем субъектам, полностью или частично входящим в АЗРФ, численность населения с 1991 года по 2015 год уменьшилась почти на 1,9 млн. человек, или на 19,3%.

Особенно ощутима нехватка квалифицированных кадров, которые покинули районы Крайнего Севера в первую очередь. Вахтовый способ организации труда эту проблему в полном объёме не решает. Отсюда вытекает необходимость разработки специальных демографических моделей для АЗРФ в целом и её прибрежных регионов в частности.

Особой проблемой, и не только в России, но и во всех полярных странах, является учёт интересов коренных малочисленных народов (КМНС), которые вступают в противоречие, прежде всего, с интересами добывающих и транспортных компаний [Tigano, Birt, Morris-Pocock, Artukhin, Vicki, 2015].

Таблица 7.3

**Численность населения по регионам АЗРФ, тыс. чел.**

Субъекты АЗРФ	Годы					
	1991	1996	2001	2005	2010	2015
Мурманская область	1 177	1 066	988	839	794	762
% к 1991 г.		90,6	83,9	71,3	67,5	64,8
Республика Карелия	798	784	760	676	643	630
% к 1991 г.		98,3	95,2	84,7	80,5	78,9
Архангельская область	1 523	1 473	1 397	1 282	1 225	1 174
% к 1991 г.		96,7	91,7	84,2	80,4	77,1
Ненецкий автономный округ	54	47	45	42	42	44
% к 1991 г.		87,0	83,3	77,6	78,0	81,3
Республика Коми	1 254	1 185	1 126	963	899	857
% к 1991 г.		94,5	89,8	76,8	71,7	68,3
Ямало-Ненецкий автономный округ	501	497	505	517	525	534
% к 1991 г.		99,2	100,8	103,3	104,8	106,6
Красноярский край	3 170	3 118	3 032	2 869	2 829	2 867
% к 1991 г.		98,4	95,6	90,5	89,2	90,4
Республика Саха (Якутия)	1 122	1 036	986	954	958	960
% к 1991 г.		92,3	87,9	85,1	85,4	85,5
Чукотский автономный округ	160	97	75	52	50	50
% к 1991 г.		60,6	46,9	32,8	31,5	31,4
Итого:	9 759	9 303	8 914	8 196	7 966	7877
% к 1991 г.		95,3	91,3	84,0	81,6	80,7

*Десятая* проблема – недостаточное финансирование. Хроническое недофинансирование государством и частным бизнесом строительства объектов транспортной инфраструктуры и перевозок в АЗРФ имеет место с начала девяностых годов прошлого века. Такая ситуация во многом сложилась благодаря дефициту федерального бюджета и отсутствием средств в регионах.

Государственные учреждения вынуждены для обеспечения завоза привлекать внебюджетные средства, что, во-первых, делает рейсы более длительными, а во-вторых, отвлекает внебюджетные средства от решения других задач, стоящих перед этими учреждениями.

Дефицит бюджетного финансирования, а также их позднее выделение на проведение закупок часто является причиной переноса сроков начала навигации, что в условиях Арктики создаёт немалые трудности для обеспечения потребителей необходимыми грузами.

*Одиннадцатая*, наиболее важная с точки зрения человеческого фактора, проблема заключается в неэффективности существующих маршрутов транспортировки. Особенно ярко она проявилась – и это будет нами показано далее – при осуществлении северного завоза на гидрометеорологические станции численностью в несколько десятков, разбросанных по всему побережью и островам Северного Ледовитого океана, его морей, а также устьевым областям крупных рек. Причина тому – построение маршрутов волонтаристским путем, который устарел как с точки зрения административно-правового ресурса, так и с экономической точки зрения. При этом необходимо ещё решать проблему приоритетов для разных категорий заказчиков, а это не только Гидрометслужба, но и представители различных ведомств и организаций. Для того чтобы ситуация изменилась, необходима разработка нового или модернизация существующего метода построения маршрутов завоза с учетом факторов, присущих российской Арктике.

*Двенадцатая* проблема – неэффективность управления всеми логистическими операциями в АЗРФ. В настоящий момент управление грузо- и пассажироперевозками рассредоточено по различным ведомствам и компаниям. Это касается всех видов транспорта и не даёт возможности эффективно использовать выделяемые для этого средства и задерживает принятие решений.

*Тринадцатая* проблема – малый грузопоток даже на традиционных трассах судоходства. Несмотря на намечающееся увеличение объёмов перевозок, главным образом за счёт углеводородного сырья – нефти и сжиженного газа, он всё равно будет несопоставим с объёмами на мировых морских транспортных путях.

Следующие три проблемы, в отличие от предыдущих, имеют уже сугубо методологический характер.

*Первая* из них – проблема недостатка информации, являющейся входной для моделей, в первую очередь, специального статистического наблюдения [Toyasaki, Wakolbinger, Kettinger, 2013]. Для решения этой проблемы необходимо обоснование и разработка соответствующих показателей именно для АЗРФ, которые позволят решать самый широкий комплекс экономических задач. Эта проблема настолько серьезна, что требует самостоятельного рассмотрения в рамках специальных исследований.

*Вторая* проблема – трудности экспертного оценивания факторов, влияющих на выбор судоходных трасс и мест выбора точек выгрузки, поскольку традиционные методы могут приводить к грубым ошибкам. Эта проблема будет подробнее рассмотрена в одной из следующих глав.

*Третья* проблема – необходимость адаптации существующих моделей. В качестве концептуальной основы для разработки комплекса логистических моделей нами выбраны такие ключевые проблемы, как ограниченная пропускная способность коммуникаций, транспортная разрозненность арктических территорий, дефицит финансирования, нехватка технологий и компетенций, отсутствие условий для участия частного сектора в ее развитии. Соответственно, в структуру комплекса включаются такие составляющие, как: модели транспортных потоков в сетях [Blokus-Roszkowska, Smolarek, 2013], производственных и технологических мощностей, инвестиций и финансовых потоков, регулирования и управления. Связующей основой комплекса является транспортно-экономический баланс, регулирующий соотношения между размерами производства и потребления, с одной стороны, и ресурсами и потребностями в конкретных продуктах – с другой. С его помощью могут определяться необходимые размеры ввоза и вывоза продуктов, потребность в транспортных средствах, основные корреспондирующие пункты, расчетные мощности различных видов транспорта и транспортных узлов, приоритетные направления территориально-го развития инфраструктуры [Тутыгин, 2016].

Тем не менее, несмотря на отмеченные выше объективные сложности, задача моделирования логистических операций в Арктике может и должна быть решена.

В классической сетевой постановке задача транспортного моделирования может быть сформулирована следующим образом [Иванов, Токарев, Уздемир, 1994]. Географическая область содержит пункты производства и потребления различных видов продукции и транспортные узлы для различных видов транспорта. Каждый пункт производства и потребления является транспортным узлом, по крайней мере, для одного вида транспорта, а чаще – сразу для нескольких. Пункты соединяются коммуникациями, каждая из которых предполагается ориентированной дугой соответствующего графа. Граф транспортной сети является ориентированным, без петель, при этом – не обязательно связным (например, для речного транспорта при наличии нескольких не соединяющихся между собой речных бассейнов). Однако следует заметить, что локальная связность может быть достигнута путем разукрупнения видов транспорта (например, можно считать разными видами транспорта речной транспорт в каждом из изолированных бассейнов) [Тутыгин, 2016].

Для различных коммуникаций, видов транспорта и продукции вводятся динамические потоки и балансовые соотношения перевозок, погрузок, разгрузок и простоев транспорта, потоков порожнего транспорта, складываемых, нескладываемых, невывозимых и непривозимых продуктов [Samanlioglu, Ferrell, Kurz, 2012]. В качестве ограничений модели транспортной сети вводятся такие факторы, как: пропускные способности коммуникаций и транспортных узлов, мощности погрузочно-разгрузочных механизмов, емкости складов и стоянок в транспортных узлах. Также строятся отдельные модули для решения задач транспортировки с промежуточными пунктами, перевозок разнородных грузов, передачи нефти и газа по трубопроводам.

Таким образом, моделирование логистических операций в Арктике, с учетом ее особенностей, требует применения ряда концептуально новых подходов, в отличие используемых в классических транспортных моделях, реализуемых на плотных связных графах.

Эти особенности должны быть введены как параметры в модели, а в некоторых случаях включены в нее как самостоятельные блоки – информационный и экспертный, что позволит избежать переработки всего комплекса моделей.

## Глава 8

**Моделирование логистических операций**

Для лучшего понимания проблемы моделирования морских логистических операций в АЗРФ рассмотрим этот вопрос в общей постановке, как моделирование экономической системы, состоящей из всех видов транспорта и транспортных операций [Тема ФНИР, Отчет № АААА-Б17-217032350057-5].

Сегодня в научной литературе достаточно подробно раскрыто понятие и сущность «экономической системы». Например, Б.А. Райзберг и Л.Ш. Лозовский понимают под экономической системой исторически возникшую или установленную, действующую в стране совокупность принципов, правил, законодательно закрепленных норм, определяющих форму и содержание основных экономических отношений, возникающих в процессе производства, распределения, обмена и потребления экономического продукта [Тутыгин, Амбросевич, 2008]. Г.Б. Клейнер полагает, что «...к числу экономических систем, естественно, относятся предприятия, организации, рынки, страны и другие виды экономических объектов. Однако состав социально-экономических систем неизмеримо шире, поскольку, согласно определению, к числу систем могут быть отнесены институты и институциональные совокупности, системы знаний, процессы, проекты и т.д.» [Клейнер, 2010].

Таким образом, понятие экономической системы достаточно обширно и может включать в себя: территории (государство, регион), отрасль, производственный комплекс, кластер, инфраструктуру и т.д. Но, независимо от определения, при любом из подходов к пониманию, что такое экономическая система, для принятия стратегических решений необходимо учитывать различные сочетания сценариев их развития и складывающийся тип соответствующих инвестиционных сценариев.

Под инвестиционным сценарием мы понимаем такой путь развития, в котором в качестве одного из основных приоритетов заложено создание либо качественное улучшение объектов инфраструктуры. При этом к инфраструктуре мы традиционно относим объекты промышленности, энергетики, транспортные коммуникации, объекты жилищно-коммунальной и социальной сферы. Оче-

видно, что инвестиции, и прежде всего капитальные вложения в инфраструктурные объекты и проекты являются долгосрочными с точки зрения окупаемости, поэтому зачастую имеют невысокую привлекательность для частных инвесторов. Таким образом, значительная нагрузка и ответственность по развитию инфраструктуры традиционно приходится на долю государства, которое, в свою очередь, должно осознавать, что основная часть капитальных вложений ляжет на его плечи.

Для инвестиционного сценария характерна такая структура инвестиций, в которой существенно преобладают капитальные вложения в объекты инфраструктуры. При формировании начальных условий инвестиционного сценария нужно исходить из того, что существующие объекты инфраструктуры имеют высокую степень износа либо находятся в неудовлетворительном состоянии; либо ощущается недостаток инфраструктурных объектов; либо таковые объекты отсутствуют вовсе.

В макроэкономической науке о сценариях вспоминают чаще всего тогда, когда речь идет о социально-экономическом развитии государств, отдельных территорий, регионов, городских агломераций. Вместе с тем, многое из того, что традиционно относится к территориальным стратегиям, справедливо и в приложениях к вопросам инвестиционного развития различных экономических систем и структур. Например, как справедливо отмечают В.Е. Рохчин и В.Н. Ветрова [Рохчин, Ветрова, 2014], построение сценария социально-экономического развития региона должно начинаться с определения критериев, которые будут лежать в его основе. При этом необходимо учитывать сценарии и сценарные условия развития как мировой и российской экономики, так и региональной. Продолжая эту мысль, следует отметить, что в случае построения инвестиционного сценария как составной части общего сценария развития экономической системы, определение таких критериев должно опираться на потребности, связанные с инфраструктурным развитием.

На практике обычно выделяют три подхода к разработке сценариев. Условно назовем их так: 1 – «сверху вниз», 2 – «сборка снизу», 3 – «разрабатываемые на разных уровнях независимо друг от друга». Все три подхода имеют право на существование как по отдельности, так и в различных сочетаниях друг с другом. Преоб-

ладание того или иного из них зависит, прежде всего, от наличия и распределения необходимых ресурсов. Так, если все ресурсы сконцентрированы в одних руках, то, скорее всего, будет преобладать первый подход. В реальной действительности, как уже отмечено, встречаются различные комбинации этих трех подходов, при этом должен соблюдаться некий баланс институциональных интересов. Заказчиками инвестиционных сценариев являются ресурсодержатели, у каждого из которых есть свои определенные цели и критерии.

На рис. 8.1 представлена позиционная матрица, с помощью которой можно проиллюстрировать предлагаемую методологию (назовем ее методологией пошаговой корректировки инвестиционных сценариев) [Тутыгин, Чижова, 2015].

Данная методология помогает осуществлять краткосрочное и среднесрочное планирование в рамках стратегических задач, не отклоняясь от основного курса достижения цели. Методология основана на использовании системного подхода, в частности ситуационного анализа. Последний, в свою очередь, предназначен для позиционирования (определения того места, где мы находим-

СОЧЕТАНИЕ СЦЕНАРИЙНЫХ УСЛОВИЙ	Оптимистический инвестиционный сценарий	Реалистический инвестиционный сценарий	Пессимистический инвестиционный сценарий
Оптимистический сценарий развития экономической системы (РЭС)	<i>1.1 – сочетание оптимистических сценариев</i>	<i>1.2 – оптимист сценарий РЭС, реалистический инвест. сценарий</i>	<i>1.3 – оптимист сценарий РЭС, пессимистический инвест. сценарий</i>
Реалистический сценарий развития экономической системы	<i>2.1 – реалистич. сценарий РЭС, оптимист. инвест. сценарий</i>	<i>2.2 – сочетание реалистических сценариев (равновесное состояние)</i>	<i>2.3 – реалистич. сценарий РЭС, пессимист. инвест. сценарий</i>
Пессимистический сценарий развития экономической системы	<i>3.1 – пессимист. сценарий РЭС, оптимист. инвест. сценарий</i>	<i>3.2 – пессимист. сценарий РЭС, реалист. инвест. сценарий</i>	<i>3.3 – сочетание пессимистических сценариев</i>

Рис. 8.1. Позиционная матрица

ся сейчас) и использования определенного набора инструментов и методов осуществления перехода в желаемое состояние (управление по целям).

Методология пошаговой корректировки инвестиционных сценариев дает возможность осуществлять опережающее управление. На каждом шаге мы можем оценить имеющиеся ресурсы и спланировать выполнение необходимых мероприятий. При этом одномерная задача оценки инвестиционных ожиданий становится двумерной, разворачивая развитие экономической системы по ее специфическим особенностям.

Предлагаемая методология, которая схематично может быть представлена матрицей инвестиционных сценариев и сценариев развития экономической системы, позволяет, с одной стороны, наращивать количество вариантов решений, с другой – выполнять дальнейшую детализацию блоков решений. Таким образом, мы фактически переходим к технологии пошаговой подготовки решений с учетом позиционирования, приведенного выше на рис. 8.1.

Опишем некоторые позиции и пошаговые переходы с использованием схемы (матрицы выбора), приведенной на рис. 8.2.

Позиция 1.1. (оба сценария – как развития экономической системы (РЭС), так и инвестиционный – оптимистические). Характеризуется высокими ожиданиями инвесторов, благоприятным инвестиционным климатом, наличием перспективных крупных инфраструктурных проектов, положительной динамикой в рас-



Рис. 8.2. Матрица выбора

смаатриваемой экономической системе. Все это происходит на фоне благоприятной конъюнктуры мировых рынков и экономического роста в стране.

Позиция 1.2. (оптимистический сценарий РЭС и реалистичный инвестиционный сценарий). Инвесторы реально оценивают ситуацию, в том числе существующие и потенциальные риски, имеется ряд крупных перспективных проектов, которые не в полной мере подтверждаются сложившейся экономической ситуацией и тенденциями развития экономики. Складывается дисбаланс между стратегическими целями проектов и возможностями ресурсодержателей, в частности инвесторов.

Позиция 1.3. Более худший, по сравнению с вариантом 1.2, является крайне нежелательным (оторван от реальности).

Позиция 2.1. Имеющиеся проекты соответствуют экономическим реалиям и потребностям экономики. Плановые индикаторы проектов подтверждаются экономическими прогнозами, но при этом ожидания инвесторов несколько завышены, а риски инвестиций ими недооценены. Причинами этому могут быть кратковременные позитивные сдвиги мировой конъюнктуры, превалирование предложения капитала над спросом, недооценка геополитической ситуации и т.д.

Позиция 2.2. Ситуация равновесия между экономическими реалиями и ожиданиями инвесторов, достаточно благоприятный инвестиционный климат, стабильная ситуация в экономике, взвешенные оценки. Отсутствие видимых внешних и внутренних угроз.

Позиция 2.3. При сохранении экономической ситуации, описанной в позиции 2.2, усиливаются опасения инвесторов в части ожидаемых рисков, возможно проявление опережающих сигналов на финансовых рынках, предупреждающих об изменениях в экономике, возможные проявления угроз неэкономического характера (геополитические, военные).

Позиция 3.1. Вариант практически нереализуемый, но может иметь место при кратковременном избытке свободных средств у инвесторов и отсутствии спроса на инвестиции в экономике. Данный вариант, как правило, характеризуется высокой коррупционной составляющей и наличием теневых схем.

Позиция 3.2. При депрессивном состоянии в экономике у потенциальных инвесторов имеются обоснованные ожидания и

намерения. Данная ситуация свидетельствует о наличии долгосрочных планов инвесторов, но эти планы не совпадают с существующей экономической картиной. Инвесторы действуют по принципу «темной лошадки».

**Позиция 3.3.** Ситуация кризиса либо депрессии (посткризисная ситуация).

Отметим, что основой как позиционной матрицы, так и матрицы выбора является некий каркас, включающий в себя по горизонтали позиции 2.1, 2.2, 2.3, по вертикали – позиции 1.2, 2.2 и 3.2 (при этом ситуация 2.2 соответствует состоянию равновесия).

Отклонение по линии 2.1–2.2–2.3 характеризует поведение инвесторов в условиях устойчивой долгосрочной тенденции в развитии системы, привязанной к экономическим реалиям. Одна из основных задач здесь – вовремя войти в равновесное состояние 2.2, при этом реализуется принцип управления временем. Данная линия является долгосрочной, колебания на линии медленные.

Линия 1.2–2.2–3.2. В силу своей мобильности пул инвесторов не может долго находиться в одном состоянии, т.е. данная линия – короткая по времени. Пока инвестор находится в равновесном состоянии (2.2), нужно в довольно сжатые сроки отобрать наиболее реалистичные проекты для инвестирования. Попадание в ситуацию 3.2 таит в себе угрозу перехода в кризисную ситуацию 3.3. Поэтому должен быть выстроен жесткий барьер, не допускающий такого перехода. Переход из ситуации 2.3 в 3.3 маловероятен и может быть последствием каким-либо форс-мажорных обстоятельств.

Переходы 1.1–1.2 и 1.1–2.1. Ввиду кратковременности и неустойчивости состояния 1.1. переходы 1.1–1.2 и 1.1–2.1, скорее всего, произойдут «автоматически», под влиянием сложившихся условий, при этом переход 1.1–1.2 снижает риски инвесторов, а переход 1.1–2.1 снижает риски, связанные с реализацией самих проектов.

Переход от 1.2 к 1.1 – это, фактически, обман инвестора с целью завышения его ожиданий. Переход от 2.1 к 1.1 означает предложение проектов, не соответствующих реальным потребностям экономической системы, он может привести к резкому снижению эффективности инвестиций.

Состояния 1.2 и 2.1 являются неустойчивыми, поэтому вполне логичен переход в состояние 2.2 «Северо-западный угол» матрицы не предполагает существенных ресурсных затрат, нужно лишь

время и взвешенные оценки. Логическим завершением квадрата 2.1–1.1–1.2–2.2 является переход в ситуацию 2.2 и удержание системы в этой точке.

Квадрант 1.2–1.3–2.3–2.2. Крайне нежелательным является переход 1.2–1.3. Он будет означать, что ожидания и интерес инвесторов упали, а держатели проектов вовремя на это не отреагировали. Это может быть спровоцировано отсутствием конструктивного диалога между держателями проектов и инвесторами. Обратный переход от 1.3 к 1.2 требует определенных усилий для повышения инвестиционной привлекательности, но он связан с ростом рисков для инвестора. Более трудным является путь 1.3–2.3–2.2, который предполагает тщательный отбор, проработку и взвешенную оценку проектов и лишь затем 2.3–2.2 выработку согласованных проектно-инвестиционных решений.

Квадрант 3.2–3.1–2.1–2.2. Переход из 2.1 в 3.1 практически нереален, он возможен лишь в том случае, когда имеющиеся проекты требуют кардинальной переработки. Переход от 3.1 к 2.1 означает необходимость разработки реальных проектов, соответствующих высоким ожиданиям инвесторов, причем временные рамки такого перехода достаточно ограничены в связи с тем, что инвесторы долго не могут оставаться в этом состоянии. Переход 3.1–3.2 с печальной перспективой ухода в 3.3 означает снижение инвестиционной привлекательности при отсутствии сколь-нибудь интересных проектных решений.

В данном квадранте особое внимание следует уделить позиции 3.1, чтобы в случае попадания в нее срочно перейти в 2.1, а не в 3.2.

Последний квадрант 2.2–2.3–3.3–3.2 содержит в себе опасность попадания в ситуацию 3.3, чего необходимо избегать всеми возможными способами. При этом переход из 3.2 в 2.2 тот же, что из 3.2 в 2.1.

Теперь попробуем ответить на вопрос, что же делать, если сложившиеся обстоятельства привели систему в ситуацию 3.3, когда нет ни проектов, ни сколь-нибудь реальных инвесторов? Так как попытка перехода из 3.3 в 3.2 повлечет за собой неоправданно высокие риски для инвесторов, то единственно возможный путь – переход из 3.3 в 2.3, который при отсутствии интереса инвесторов потребует больших усилий и волевых решений со стороны субъекта управления системой.

В заключение отметим, что в процессе работы над этой методологией был сформирован следующий список проблемных вопросов:

- 1) формализация критериев позиционирования (вплоть до числовых параметров);
- 2) проблема раннего обнаружения слабых сигналов (ранней диагностики);
- 3) детальное описание переходов с учетом временных параметров и необходимых ресурсов;
- 4) синхронизация процессов, имеющих различные динамические характеристики и временные рамки.

При моделировании логистических операций возникают несколько типов стандартных задач, которые необходимо в виде отдельных модулей встраивать в разрабатываемые комплексы моделей. Рассмотрим некоторые из таких наиболее часто встречающихся задач транспортного типа.

1. Транспортировка однородного продукта с промежуточными пунктами. Содержательная постановка задачи заключается в организации схемы перевозок однородного продукта из пунктов производства в пункты потребления через промежуточные пункты. При этом, как и в классической транспортной задаче, заданы ограничения по объемам производства и потребления продукта, а также ограничения на объемы перевозок между пунктами. Требуется найти план перевозок, обеспечивающий эффективное функционирование системы и удовлетворяющий заданным ограничениям.

Исходные параметры задачи следующие. Пусть  $I$  – множество пунктов производства,  $J$  – множество промежуточных пунктов,  $K$  – множество пунктов потребления. Обозначим через  $A_i$  – максимальный объем производства продукта пунктом  $i$ ;  $B_k$  – минимальный объем продукта, который необходимо доставить  $k$ -му пункту потребления;  $D_{jk}$  – максимальное количество продукта, которое может быть доставлено из  $j$ -го промежуточного пункта  $k$ -му потребителю;  $E_{ij}$  – максимальный объем продукта, который может быть доставлен из  $i$ -го пункта производства в  $j$ -й промежуточный пункт,  $i \in I, j \in J, k \in K$ .

Обозначим через  $x_{ijk}$  – количество продукта, которое будет перевезено из пункта производства  $i$  через  $j$ -й промежуточный пункт  $k$ -му потребителю,  $i \in I, j \in J, k \in K$ .

Модель задачи включает в себя систему ограничений по объемам производства (8.1), по потреблению продукта (8.2), по суммарному объему перевозок до промежуточных пунктов (8.3) и от промежуточных пунктов до потребителей (8.4), а также естественные ограничения на переменные (8.5).

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijk} \leq A_i, i \in I, \quad (8.1)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \geq B_k, k \in K, \quad (8.2)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} \leq E_{ij}, i \in I, j \in J, \quad (8.3)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijk} \leq D_{ij}, j \in J, k \in K, \quad (8.4)$$

$$x_{ijk} \geq 0, i \in I, j \in J, k \in K. \quad (8.5)$$

Критерии оптимизации, определяющие эффективность функционирования системы, могут зависеть от различных показателей искомого плана перевозок. Так, например, если к таким показателям относятся объемы производства продукции в пунктах производства и объемы потребления продукции в пунктах потребления, то рассматриваемая задача будет заключаться в определении такого плана перевозок, для которого выполняются ограничения (8.1)–(8.5), и принимают экстремальные значения критерии

$$f_i \left( \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijk}, A_i \right), i \in I, \quad \varphi_k \left( \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk}, B_k \right), k \in K, \quad \text{определяющие,}$$

соответственно, условия эффективности функционирования пунктов производства и пунктов потребления. Каждая конкретная задача определяется выбором показателей искомого плана, определяющих эффективность функционирования системы, и выбором функций, формализующих критерии оптимальности.

2. Транспортировка разнородных грузов. По сравнению к предыдущей задаче в модель добавляются множество видов продукции  $L$  и множество связей  $M$  между пунктами, а структура транспортной системы перевозки продукции определяется ориентированным графом  $G = (I \cup J \cup K, M)$  без петель и контуров, в котором  $M \subseteq (I \cup J \cup K)^2$ .

Обозначим через  $A_{il}$  – максимально возможный объем производства продукции вида  $l$  пунктом производства  $i$ ,  $i \in I$ ,  $l \in L$ ;  $B_{kl}^-$ ,  $B_{kl}^+$  – минимально допустимый и максимально требуемый объемы потребления продукции вида  $l$  пунктом потребления  $k$ ,  $k \in K$ ,  $l \in L$ ;  $D_k$  – максимально возможный общий объем всей продукции, который способен разместить пункт потребления  $k$ ,  $k \in K$ ;  $E_{ijl}$  – максимально возможный объем перевозки продукции вида  $l$  из пункта  $i$  в пункт  $j$ ,  $(i, j) \in M$ ,  $l \in L$ ,  $x_{ijl}$  – объем продукции вида  $l$ , которая будет перевезена из пункта  $i$  в пункт  $j$ ,  $(i, j) \in M$ ,  $l \in L$ .

С учетом наличия разнородных грузов ограничения (8.6)–(8.10) будут аналогичны ограничениям предыдущей задачи

$$\sum_{(i,j) \in M} x_{ijl} \leq A_{il}, i \in I, l \in L, \quad (8.6)$$

$$\sum_{(i,j) \in M} x_{ijl} \leq A_{il}, i \in I, l \in L, \quad (8.7)$$

$$B_{kl}^- \leq \sum_{(i,k) \in M} x_{ikl} \leq B_{kl}^+, k \in K, l \in L, \quad (8.8)$$

$$\sum_{(i,k) \in M} \sum_{l \in L} x_{ikl} \leq D_k, k \in K, \quad (8.9)$$

$$0 \leq x_{ijl} \leq E_{ijl}, (i, j) \in M, l \in L. \quad (8.10)$$

Критерии оптимальности могут зависеть от различных показателей искомого плана перевозок разнородной продукции, к которым относятся, например:

– объемы производства продукции каждого из видов пунктами производства;

– объемы потребления продукции каждого из видов пунктами потребления;

– объемы размещения продукции пунктами потребления.

Тогда рассматриваемая задача будет заключаться в определении такого плана перевозок, для которого выполняются ограничения (8.6)–(8.10) и принимают экстремальные значения критерии

$$f_{il} \left( \sum_{(i,j) \in M} x_{ijk}, A_{il} \right), i \in I, l \in L \quad \varphi_{kl} \left( \sum_{(i,k) \in M} x_{ijk}, B_{kl}^-, B_{kl}^+ \right), k \in K, l \in L,$$

$$\varphi_k \left( \sum_{(i,k) \in M} \sum_{l \in L} x_{ikl}, D_k \right), k \in K,$$

определяющие условия эффективности функционирования пунктов производства и пунктов потребления.

3. Планирование поставок нефти для переработки. Рассматривается система, которая из сырья, используя различные технологические установки, производит готовую продукцию. Сырье через ёмкости поступает на технологические установки. На технологических установках под воздействием технологических режимов сырьё перерабатывается в продукты производства. Готовые продукты производства поступают в ёмкости для готовой продукции, а затем потребителям готовой продукции. Заданы ограничения на объёмы ёмкостей и ограничения на производительности технологических установок.

При планировании учитываются следующие экономические показатели:

– стоимость единицы сырья в зависимости от такта поступления;

– затраты на заполнение и извлечения сырья из ёмкостей;

– затраты на переработку сырья технологическими установками;

– затраты на отгрузку готовой продукции;

– доходы от отгрузки готовой продукции потребителям.

Требуется найти такой план производства готовой продукции, который обеспечивал бы эффективное функционирование предприятия и позволял бы определять:

- общий объём сырья, который должен поступать на предприятие за весь период планирования,
- сколько сырья потребуется предприятию по тактам планирования,
- как сырьё должно быть распределено по ёмкостям по тактам планирования,
- как сырьё должно поступать по тактам на технологические установки,
- как готовая продукция по тактам должна поступать в ёмкости готовой продукции,
- какие объёмы готовой продукции по тактам предприятие может отгружать потребителям.

Пусть  $T$  – множество тактов функционирования системы,  $I$  – множество ёмкостей под сырьё,  $J$  – множество технологических установок,  $K$  – множество различных видов готовой продукции, которые выпускает предприятие,  $S$  – множество ёмкостей под готовую продукцию,  $P$  – множество потребителей готовой продукции.

Обозначим через  $A_i$  – максимальный объём сырья, который может быть помещён в ёмкость под сырьё  $i$ ,  $i \in I$ ;  $B_{jk}$ ,  $C_{jk}$  – минимально и максимально возможные производительности  $j$ -ой технологической установки по готовой продукции  $k$ ,  $j \in J$ ,  $k \in K$ ;  $D_{ks}$  – максимальный объём готовой продукции  $k$ , который можно поместить в ёмкость для готовой продукции  $s$ ,  $k \in K$ ,  $s \in S$ ;  $E_{kpt}$ ,  $H_{kpt}$  – минимальный и максимальный объёмы продукции  $k$ , который требуется потребителю  $p$  в такт  $t$ ,  $k \in K$ ,  $p \in P$ ,  $t \in T$ . Здесь предполагается, что  $A_i \geq 0$ ,  $0 \leq B_{jk} \leq C_{jk} < \infty$ ,  $D_{ks} \geq 0$ ,  $0 \leq E_{kpt} \leq H_{kpt} < \infty$ ,  $i \in I$ ,  $j \in J$ ,  $k \in K$ ,  $s \in S$ ,  $p \in P$ ,  $t \in T$ .

Пусть  $a_t$  – стоимость единицы сырья в такт  $t$ ,  $t \in T$ ;  $b_{it}$  – затраты на перемещение единицы сырья из ёмкости для сырья  $i$  в такт  $t$  в любую технологическую установку;  $c_{jkt}$  – затраты на переработку единицы сырья установкой  $j$  в продукт  $k$  в такт  $t$ ,  $j \in J$ ,  $k \in K$ ,  $t \in T$ ;  $d_{kspt}$  – затраты на отгрузку готовой продукции  $k$  потребителю  $p$  из ёмкости для готовой продукции  $s$  в такт  $t$ ,  $k \in K$ ,  $s \in S$ ,  $p \in P$ ,  $t \in T$ ;  $e_{kpt}$  – доход от отгрузки в такт  $t$  единицы готовой продукции  $k$ , потребителю  $p$ ,  $k \in K$ ,  $p \in P$ ,  $t \in T$ .

Обозначим через  $x_{ijkpt}$  количество сырья, которое из ёмкости  $i$  поступит на установку  $j$  для изготовления продукта  $k$ , который

через ёмкость  $s$  будет отправлен потребителю  $p$  в такт  $t$ ,  $i \in I, j \in J, k \in K, s \in S, p \in P, t \in T$ .

Модель задачи планирования для нефтеперерабатывающих предприятий включает системы ограничений по количеству сырья (8.11), готового продукта (8.12), по вместимости ёмкостей (8.13) и (8.14), а также естественные ограничения на переменные.

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} x_{ijkpst} \leq A_i, i \in I, t \in T; \quad (8.11)$$

$$B_{jk} \leq \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} x_{ijkpst} \leq C_{jk}, j \in J, k \in K, t \in T; \quad (8.12)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} x_{ijkpst} \leq D_{ks}, s \in S, k \in K, t \in T; \quad (8.13)$$

$$E_{kpt} \leq \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} x_{ijkpst} \leq H_{kpt}, p \in P, k \in K, t \in T; \quad (8.14)$$

$$x_{ijkpst} \geq 0, i \in I, j \in J, k \in K, p \in P, t \in T. \quad (8.15)$$

В набор критериев оптимизации объёмно-календарного планирования могут быть включены следующие:

– доход от реализации продукции

$$F_1(X) = \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} w_{kpt} \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} x_{ijkpst} \rightarrow \max$$

– затраты на отгрузку готовой продукции

$$F_2(X) = \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} d_{kspt} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijkpst} \rightarrow \min,$$

– затраты на переработку сырья

$$F_3(X) = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} c_{jkt} \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} x_{ijkpst} \rightarrow \min,$$

– затраты на перемещение сырья из ёмкостей в технологические установки

$$F_4(X) = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} d_{it} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} x_{ijkspt} \rightarrow \min,$$

– затраты на приобретение сырья

$$F_5(X) = \sum_{t \in T} a_t \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} x_{ijkspt} \rightarrow \min.$$

Пусть  $X^0 = \|x_{ijkspt}^0\|$  – оптимальное решение задачи, тогда суммированием по соответствующим индексам можно получить необходимые значения объёмов сырья и продукции, обеспечивающие эффективное функционирование производственной системы:

- общий объём сырья, который должен поступить на предприятие за весь период планирования,
- объём сырья, который должен поступать на предприятие по тактам планирования,
- распределение сырья по тактам планирования по ёмкостям под сырьё,
- поступление сырья по тактам планирования на технологические установки,
- поступление готовой продукции по тактам планирования в ёмкости готовой продукции,
- объёмы готовой продукции по тактам планирования, которые будут отгружены потребителям.

4. Транспортировка газа. Основными элементами системы являются газовые промыслы, компрессорные станции с газоперекачивающими агрегатами и соединяющие их газопроводы. Схема включает в себя добычу газа на промыслах, обладающих ограниченными объёмами, непосредственно транспортировку газа по различным ниткам газопроводов с ограниченными пропускными способностями и прохождение газа через компрессорные станции, каждая из которых в свою очередь обладает ограниченной мощностью. Требуется при существующих ограничениях на заданный период планирования при «штатных» условиях определить максимально возможные объёмы транспортировки газа в существующей системе при минимальных затратах на обслуживание всей системы. Здесь под «штатными» условиями понимаются условия

безаварийной работы, при которых любые заданные для элементов системы характеристики могут быть достигнуты.

Пусть  $i = \overline{1, m}$  – номера компрессорных станций  $j = \overline{1, q_{ik}}$  – номера ниток газопровода, соединяющих станцию с номером  $i$  со станцией с номером  $k$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $k = \overline{1, m}$ ;  $W_{jik}$  – максимально возможная пропускная способность нитки с номером  $j$ , соединяющей станцию  $i$  со станцией  $k$ ,  $j = \overline{1, q_{ik}}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $k = \overline{1, m}$ ;  $G_{jik}$  – максимальная «мощность» цеха компрессорной станции  $i$ , обслуживающего  $j$ -ю нитку газопровода, соединяющего компрессорные станции с номерами  $i$  и  $k$ ,  $j = \overline{1, q_{ik}}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $k = \overline{1, m}$ ;  $Q_i$  – мощность компрессорной станции с номером  $i$ ,  $i = \overline{1, m}$ ;  $c_{jik}$  – затраты на транспортировку единицы объема газа компрессорным цехом  $i$ -й компрессорной станции, обслуживающим  $j$ -ю нитку газопровода, от  $i$ -й до  $k$ -й компрессорной станции,  $j = \overline{1, q_{ik}}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $k = \overline{1, m}$ .

$V_i$  – объём газа, который может поступить на компрессорную станцию с номером  $i$  с газовых промыслов, которые эта станция обслуживает,  $V_i \geq 0$ ,  $i = \overline{1, m}$ . В случае, если компрессорная станция осуществляет только транзит газа с предыдущих станций, то  $V_i = 0$ ,  $i = \overline{1, m}$ . Будем предполагать, что пропускные способности ниток газопровода и «мощности» цехов компрессорных станций измеряются в тех же самых единицах.

Обозначим через  $x_{jik}$  – объём газа, который будет передан по нитке с номером  $j$  от компрессорной станции  $i$  до компрессорной станции  $k$ ,  $j = \overline{1, q_{ik}}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $k = \overline{1, m}$ .

В модель включаются ограничения по объемам газа, передаваемых от компрессорных станций с заданными мощностями (8.16), уравнения баланса (8.17) по каждой компрессорной станции  $i$ , по пропускным способностям ниток газопровода и обслуживающим их мощностям (8.18), а также естественные ограничения на переменные (8.19).

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^{q_{ik}} x_{jik} \leq Q, \quad i = \overline{1, m}, \quad (8.16)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^{q_{ik}} x_{jik} = V_i + \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^{q_{ki}} , \quad i = \overline{1, m}, \quad (8.17)$$

$$x_{jik} \leq \min(G_{jik}, W_{jik}), \quad j = \overline{1, q_{ik}}, \quad i = \overline{1, m}, \quad k = \overline{1, m}, \quad (8.18)$$

$$x_{jik} \geq 0, \quad j = \overline{1, q_{ik}}, \quad i = \overline{1, m}, \quad k = \overline{1, m}. \quad (8.19)$$

Модель планирования транспортировки газа представляет собой систему линейных ограничений транспортного типа (8.16)–(8.19) с двумя критериями – максимизации суммарного объема транспортируемого газа (8.20) и минимизации затрат на транспортировку (8.21).

$$F(X) = \min_{i=1, m} \left( \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^{q_{ik}} x_{jik} \right) \rightarrow \max, \quad (8.20)$$

$$Q(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^{q_{ik}} c_{jik} x_{jik} \rightarrow \min. \quad (8.21)$$

5. Газовые скважины. Рассматривается система, описывающая функционирование газового промысла, обслуживающего месторождение, объекты добычи которого по геолого-техническим и территориальным признакам разделяются на несколько куполов. Каждый газовый купол состоит из ряда кустов газовых скважин. Добыча газа осуществляется с использованием различных технологических режимов (газовый режим, водонапорный режим, жесткий водонапорный режим). Режимы работы всех скважин заранее определены, и все расчеты проводятся с учетом этих режимов.

Процесс добычи газа описывается следующей схемой. Предполагается, что начальное пластовое давление (давление на забой любой скважины) купола известно. Объем добычи газа из скважины регулируется системой кранов-регуляторов, при этом очевидно, что при открытых кранах скважина дает максимальный объем добычи, но при этом устьевое давление скважины будет минимально, а при закрытых кранах – объем добычи газа минима-

лен, а устьевое давление скважины максимально. В общем случае функция, определяющая устьевое давление газа скважины от объема добытого газа, является квадратичной монотонно убывающей функцией. Так как изменение пластового давления газа происходит достаточно медленно, то будем предполагать, что на выбранном интервале планирования можно пренебречь квадратичной составляющей и считать, что функции, определяющие зависимость забойного давления скважины от объема добываемого газа на заданном интервале времени, линейные. При такой идеализации необходимо определить интервал времени (интервал планирования), на котором выполняются принятые условия, и для каждого интервала планирования заново решать задачу при измененных исходных параметрах.

Для применяемых технологических режимов добычи газа предложенная идеализация представляется вполне естественной. Действительно, в случае использования водонапорных режимов вода в забое «удерживает» постоянное давление на забое скважины, а при использовании газового режима по мере выработки запасов газа пластовое давление уменьшается по линейному закону.

Добытый в скважинах газ по газосборным сетям поступает на установки предварительной подготовки газа, в которых сырой газ освобождается от примесей. Каждая установка предварительной подготовки газа обслуживает, как правило, отдельный газовый купол. С установок предварительной подготовки газ поступает на установку комплексной подготовки газа, в которой происходит «глубокая осушка» газа. Подготовленный к транспортировке газ из установки комплексной подготовки поступает в магистральный газопровод.

Предполагаются известными:

– минимально допустимые и максимально возможные объемы добычи газа для каждой скважины (на дебиты скважин накладываются ограничения: со стороны процессов гидратообразования, разрушения призабойной зоны, условий разработки месторождения и процессов обводнения конусом подошвенных вод);

– минимально допустимые и максимально возможные объемы газа, которые могут быть переданы по ниткам газопроводов, соединяющим газовые скважины с установками подготовки газа;

– минимально допустимый и максимально возможный объем газа, который может переработать каждая установка предварительной подготовки газа;

– минимально допустимые и максимально возможные значения давления газа как на выходе каждой скважины, так и на входе установки предварительной подготовки газа;

– зависимость давления газа на выходе скважины от объема добычи газа при разных технологических режимах.

Основной особенностью рассматриваемой системы является то, что все скважины одного куста сообщаются между собой общими коллекторами, а с обслуживающей их установкой предварительной подготовки газа посредством газосборной сети, тем самым при различных давлениях на выходе сообщающихся скважин эти давления выравниваются. При этом если на скважине определен режим работы, обеспечивающий заданное давление газа на выходе, то изменение давления скважины из-за выравнивания давления во всей системе скважин нарушает допустимый технологический режим, что может привести к аварийным ситуациям.

Требуется определить максимально возможный объем газа, который может быть получен каждым куполом, объемы газа, которые должны добывать отдельные скважины при условии, что давление на выходе скважин каждого купола должны быть по возможности близки друг к другу.

Исходные параметры. Пусть  $I$  – множество куполов газовых скважин;  $J_i$  – множество скважин  $i$ -го купола,  $i \in I$ ,  $K$  – множество технологических режимов, обеспечивающих добычу газа в скважинах. Обозначим через  $q_{ij}^-, q_{ij}^+$  соответственно минимально допустимый и максимально возможный объемы добычи газа  $j$ -й скважиной  $i$ -го купола,  $j \in J_i$ ,  $i \in I$ ;  $r_{(j,i)}^-, r_{(j,i)}^+$  – соответственно минимальная и максимальная пропускная способность газопровода, соединяющего  $j$ -ю скважину  $i$ -го купола с установкой предварительной подготовки газа, обслуживающей  $i$ -й купол скважин,  $j \in J_i$ ,  $i \in I$ ;  $V_i^-, V_i^+$  – соответственно минимально возможный и максимально допустимый объем газа, который может переработать установка предварительной подготовки газа, обслуживающая  $i$ -й купол газовых скважин,  $i \in I$ ;  $P_{ij}^-, P_{ij}^+$  – соответственно минималь-

но допустимое и максимально возможное давление на выходе  $j$ -й скважины  $i$ -го купола,  $j \in J_i$ ,  $i \in I$ ;  $Q_i^-$ ,  $Q_i^+$  – соответственно минимально допустимое и максимально возможное давление на входе установки предварительной подготовки газа, обслуживающей  $i$ -й купол газовых скважин,  $i \in I$ .

Пусть  $\varphi_{ij}^k(x)$  – функции, определяющие зависимость давления на выходе  $j$ -й скважины  $i$ -го купола при  $k$ -м технологическом режиме работы скважины, от объема добываемого газа,  $j \in J_i$ ,  $i \in I$ ,  $k \in K$ ,  $\varphi_i(x)$  – функции, определяющие зависимость давления газа на входе установки предварительной подготовки газа, обслуживающей  $i$ -й купол газовых скважин в зависимости от объема газа, поступившего на установку,  $i \in I$ ,  $x_{ijk}$  – объем добычи газа на  $j$ -ой скважине  $i$ -го купола при использовании заранее определенного  $k$ -го технологического режима работы скважины,  $j \in J_i$ ,  $i \in I$ ,  $k \in K$ .

Система включает в себя ограничения по объемам добычи (8.22), переработки (8.23), величинам давления на выходе (8.24) и входе (8.25). При этом (8.22) и (8.23) являются ограничениями транспортного типа.

$$\max(q_{ij}^-, r_{(ij)}^-) \leq x_{ijk} \leq \min(q_{ij}^+, r_{(ij)}^+), \quad j \in J_i, i \in I, \quad (8.22)$$

$$V_i^- \leq \sum_{j \in J_i} x_{ijk} \leq V_i^+, \quad i \in I, \quad (8.23)$$

$$P_{ij}^- \leq \varphi_{ij}^k(x_{ijk}) \leq P_{ij}^+, \quad j \in J_i, i \in I. \quad (8.24)$$

$$Q_i^- \leq \varphi_i\left(\sum_{j \in J_i} x_{ijk}\right) \leq Q_i^+, \quad i \in I, \quad (8.25)$$

В качестве частных критериев оптимальности принимаются максимизации объемов по каждому куполу (8.26) и максимум системы функций  $\varphi_{ij}^k(x)$ , определяющих зависимость давления (8.27):

$$F_i(X) = \sum_{j \in J_i} x_{ijk} \rightarrow \max, \quad i \in I, \quad (8.26)$$

$$R_i(X) = \min_{j \in J_i} [\varphi_{ij}^k(x_{ijk})] \rightarrow \max, \quad i \in I. \quad (8.27)$$

Задача (8.22)–(8.27) является многокритериальной с линейными ограничениями, линейными критериями (8.26) и нелинейными критериями (8.27), определяющими близость давлений для каждой скважины всего купола. Для некоторых газовых месторождений достаточно рассматривать близость давлений в пределах не всего купола, а для скважин одного куста. Очевидно, что в рамках построенной математической модели может быть поставлена и эта задача, причем ее решение может быть осуществлено алгоритмом решения исходной задачи.

## Глава 9

### Задача коммивояжёра

Моделирование различных видов систем с заданными свойствами представляет собой сложный и многогранный процесс, эффективность которого во многом зависит от выбора инструментария. В данном направлении методы и средства моделирования неоднократно доказали свою эффективность.

В этой краткой главе рассмотрим часто применяемую для моделирования логистических операций одну известную модель, получившую название «задача коммивояжёра». В основе математической постановки и математической модели классической задачи коммивояжера лежат теоретические основы графового моделирования, которые определяют основные особенности, принципы и этапы решения задач данного класса. Таким образом, на первоначальном этапе необходимо рассмотреть основные понятия графового моделирования.

В математической теории графом называется совокупность непустого множества объектов, в частности вершин и связей между ними. При этом объекты представляются в качестве вершин, или узлов графа, а связи – как дуги, или ребра. Виды графов в зависимости от области применения могут различаться направлением, ограничениями на количество связей и дополнительными данными о вершинах или ребрах.

$G$ -граф называется неориентированным, если для упорядоченной пары  $G: = (V, E)$  выполнены следующие условия:

1.  $V$  – это непустое множество вершин или узлов;
2.  $E$  – это множество пар (в случае неориентированного графа – неупорядоченных) вершин, называемых ребрами.

Размер графа – это число его ребер  $|E|$ . Порядок графа – это число вершин в графе  $|V|$ . Концевыми вершинами графа называют вершины, которые соединяют данное множество ребер. Соседними называются пара концевых вершин одного и того же ребра. Путь или цепь графа – это конечная последовательность вершин, в которой каждая вершина за исключением последней, соединена со следующей ребром.

При этом путь или цепь, в котором первая и последняя вершины совпадают, называется циклом.

Задача коммивояжера является классической комбинаторной задачей оптимизации. Ее математическая формулировка может быть представлена следующим образом: даны  $n$  городов и известны расстояния  $d_{ij}$ . Коммивояжер, выходящий из какого-либо города, должен посетить  $n - 1$  других городов (по одному разу) и вернуться в исходный. В каком порядке ему нужно посещать города, чтобы пройденное расстояние было минимальным? Пример графической постановки задачи коммивояжера представлен на рис. 9.1.

В терминах теории графов классическая задача коммивояжера может быть сформулирована следующим образом: найти гамильтонов цикл  $\mu$  наименьшей длины на реберно-взвешенном графе  $G: = (V, E)$ , вершины которого представляют собой города, а взвешенные ребра – расстояния между городами.

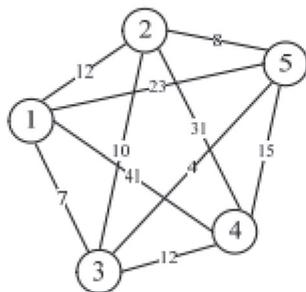


Рис. 9.1. Графическая постановка задачи коммивояжера

Математическая модель задачи коммивояжера имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q(\bar{x}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, j = \overline{1, n} \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = \overline{1, n} \\ u_i - u_j + n x_{ij} \leq n - 1, u_i \geq 0 \quad i, j = \overline{2, n} \\ x_{ij} \in \{0, 1\} \end{array} \right.$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{в цикле есть переход из } i \text{ в } j \\ 0, & \text{перехода из } i \text{ в } j \text{ в цикле нет} \end{cases}$$

Следует отметить, что задача коммивояжера в ее классической формулировке не учитывает некоторые аспекты решения, возникающие на практике.

Так, например, в задачу могут быть введены ограничения на количество объектов, ограничения на расстояние от определенного объекта. Наличие указанных ограничений приводит к появлению новой формулировки классической задачи коммивояжера или, другими словами, неклассических задач коммивояжера. Таким образом, по степени обобщенности задачи коммивояжера классифицируются на классические и неклассические.

По своим топологическим особенностям задачи коммивояжера классифицируются на симметричные и асимметричные, метрические и неметрические, замкнутые и незамкнутые.

Симметричность предполагает выполнение следующего условия:

$$d_{ij} \geq 0, d_{ij} = d_{ji}, d_{ii} = \infty, i, j = \overline{1 \dots n}.$$

В противном случае задача является асимметричной.

При выполнении условия

$$d_{ij} + d_{jk} \geq d_{ik}, i, j, k = \overline{1 \dots n} \mid i \neq j, j \neq k, i \neq k$$

задача называется метрической. В случае, если условие задачи не предполагает возврат в исходный пункт, задача называется незамкнутой (открытой).

Наличие различных классификационных признаков задачи коммивояжера подтверждает ее практическую значимость для решения широкого класса задач и актуальность изучения различных методов решения.

По результату решения задачи методы решения задачи коммивояжера классифицируются на точные и приближенные.

Точное решение предполагает построение маршрута минимальной стоимости, минимальной длины и длительности среди всех возможных маршрутов, а приближенное решение – среди всех найденных маршрутов.

В группе точных методов решения задачи коммивояжера наиболее распространены метод полного перебора, метод ветвей и границ и метод динамического программирования. Метод полного перебора основан на генерировании перестановки без повторений  $n$  элементов, например лексикографическим перебором. Следует отметить, что вычислительная сложность данного метода ограничивает его применение задачами малой размерности.

Применение метода динамического программирования к решению задачи коммивояжера имеет свои особенности.

Обозначим через  $V(G', i)$  – длину пути, проходящего по всем вершинам множества  $G'$ , с началом в вершине с номером  $i$  и концом в вершине с номером 1. Рекуррентное соотношение для задачи коммивояжера имеет следующий вид:

$$V(G', i) = \min [w_{ij} + V(G' \setminus \{x_i\}, j)], \forall j \in G'$$

при граничных условиях:

$$V(\emptyset, i) = w_{i1}$$

Алгоритм состоит в последовательном вычислении соотношений, процесс поиска решения отображается в виде дерева. Значение, полученное в результате вычисления рекуррентного соотношения, является оптимальным решением исходной задачи.

Применение метода ветвей и границ к решению задачи коммивояжера отличается принципом, по которому выполняется ветвление, и методами получения верхней и нижней оценок. При этом рассматривается полный перебор добавляемых вершин. В качестве начальной вершины ветвления выбирается произвольная вершина, например, первая.

Нижняя оценка вычисляется в соответствии со следующей формулой:

$$L = \max \left[ \sum_{j=1}^n \min w_{ij}, \sum_{i=1}^n \min w_{ij} \right]$$

Верхняя вершина находится следующим образом:

1. Произвольно выбирается вершина  $x_s \in V$  и исключается из исходного множества вершин  $V = V \setminus \{x_s\}$ .

2. Находится вершина  $y_* \in V$  такая, что  $d(x_s, x_i) = \min_{x_i \in V} d(x_s, x_i)$ .

Ребро добавляется в гамильтонов цикл  $E_T = E_T \cup \{(x_s, y_*)\}$  и вводится обозначение  $x_s = y_*$ ,  $V = V \setminus \{x_s\}$ .

3. Шаг 2 повторяется до тех пор, пока  $V \neq \emptyset$ .

Метод динамического программирования для решения задачи коммивояжера реализуется по следующему алгоритму:

1. Производится ветвление от вершины  $x_s$  таким образом, чтобы не формировать циклы.

2. Для каждой ветки, соответствующей добавлению в маршрут ребра  $(x_s, x_k)$   $k \neq s$  вычисляется верхняя и нижняя оценки.

$$L = w_{sk} + \max \left[ \sum_{j=1, n, j \neq k} \min w_{ij}, \sum_{i=1, n, i \neq s} \min w_{ij} \right].$$

3. Если в вершине существует направление  $g$ , нижняя оценка в котором больше верхней в направлении  $f: V_f < L_g$ , то  $g$  можно исключить из дальнейшего рассмотрения.

4. Шаги 1-3 повторяются до полного построения маршрута.

На практике решение задачи коммивояжера зачастую предполагает использование приближенных данных. В этом случае применение точных методов не приводит к желаемому результату. В связи с этим используются приближенные методы, к которым относятся: метод ближайшего соседа, метод ближайшего города, метод минимального остова.

Метод ближайшего соседа предполагает последовательное включение городов в маршрут. При этом каждый последующий пункт должен быть ближайшим к предыдущему и не входящим в маршрут.

Метод ближайшего соседа реализуется на основе следующего алгоритма:

1. Произвольно выбирается вершина  $x_s \in V$  и исключается из исходного множества вершин  $V = V \setminus \{x_s\}$ .

2. Находится вершина  $y_* \in V$  такая, что  $d(x_s, y_*) = \min_{x_i \in V} d(x_s, x_i)$ . Ребро добавляется в гамильтонов цикл  $E_T = E_T \cup \{(x_s, y_*)\}$  и вводится обозначение  $x_s = y_*$ ,  $V = V \setminus \{x_s\}$ .

3. Шаг 2 повторяется до тех пор, пока  $V \neq \emptyset$ .

Метод ближайшего города предполагает построение на каждом шаге маршрута по текущему подмножеству пунктов обхода, уже включенных в маршрут. Происходит добавление пункта, для которого найдется ближайший сосед из числа пунктов маршрута. Метод ближайшего города реализуется на основе следующего алгоритма:

1. Произвольно выбирается вершина  $x_s \in V$  и исключается из исходного множества вершин  $V = V \setminus \{x_s\}$ .

2. Для каждой вершины  $x_j \in V_T$  находится вершина  $y_j \notin V_T$  такая, что  $d(x_s, y_j) = \min_{x_i \in V} d(x_j, x_i) = \beta_j$ . Вершине  $x_j$  присписывается пометка  $[y_j, \beta_j]$ .

3. Выбирается такая вершина  $x_j^* \in V_T$ , для которой  $\beta_j^* = \min \beta_j$ . В дерево добавляется вершина из пометки  $V_T = V_T \cup \{y_j^*\}$ ,  $V = V \setminus \{y_j^*\}$ ,

новая вершина  $y_j^*$  размещается после  $x_j^*$ . Таким образом, множество ребер изменится:

$$E_T = \left( E_T \setminus \{(x_j^*, x_{j+1}^*)\} \right) \cup \left( \{(x_j^*, y_j^*)\} \cup \{(y_j^*, x_{j+1}^*)\} \right).$$

4. Шаги 2 и 3 повторяются до тех пор, пока  $V \neq \emptyset$ .

Так называемый «жадный» алгоритм [Rosenkrantz, 1977] является алгоритмом нахождения кратчайшего расстояния путём выбора самого короткого, ещё не выбранного ребра, при условии, что оно не образует цикла с уже выбранными рёбрами. «Жадным» этот алгоритм назван потому, что на последних шагах приходится жестоко расплачиваться за жадность.

При решении задачи коммивояжера жадный алгоритм превращается в стратегию «иди в ближайшую (в которую еще не входили) вершину». В пользу процедуры “иди в ближайший” можно сказать лишь то, что при старте из одного города она не уступит стратегии “иди в наиболее дальний”, следовательно, можем сделать вывод, что жадный алгоритм может привести к ошибкам.

Венгерский метод представляет собой алгоритм оптимизации, который решает задачу коммивояжера за полиномиальное время, был опубликован в 1955 году [Jonker, 1986].

Венгерский метод основывается на двух положениях:

- в случае, если из всех элементов некоей строки или столбца вычесть одно и то же число  $u$ , общая стоимость уменьшится на  $u$ , а оптимальное решение не изменится;

- если есть решение нулевой стоимости, оно оптимально.

Рассмотрим ещё один метод, получивший название ветвей и границ для решения задачи коммивояжера. В методах неявного перебора делается попытка так организовать перебор, используя свойства рассматриваемой задачи, чтобы отбросить часть допустимых решений. Наибольшее распространение среди схем неявного перебора получил метод ветвей и границ (ВГ), предложенный в 1960 году [Land, 1960], в основе которого лежит идея последовательного разбиения множества допустимых решений. На каждом шаге метода ВГ элементы разбиения подвергаются анализу: содержит ли данное подмножество оптимальное решение или нет. Если рассматривается задача минимизации, то проверка осуществля-

ется путем сравнения нижней оценки значения целевой функции на данном подмножестве с верхней оценкой функционала. В качестве оценки сверху используется значение целевой функции на некотором допустимом решении. Допустимое решение, дающее наименьшую верхнюю оценку, называют рекордным. Если оценка снизу целевой функции на данном подмножестве не меньше оценки сверху, то рассматриваемое подмножество не содержит решения лучше рекордного и может быть отброшено. Если значение целевой функции на очередном решении меньше рекордного, то происходит его замена. Будем говорить, что подмножество решений просмотрено, если установлено, что оно не содержит решения лучше рекордного.

Если просмотрены все элементы разбиения, алгоритм завершает работу, а текущий рекорд является оптимальным решением. В противном случае, среди непросмотренных элементов разбиения выбирается так называемое перспективное множество. Оно подвергается разбиению и анализу по описанной выше схеме. Процесс продолжается до тех пор, пока не будут просмотрены все элементы разбиения.

### Практическая реализация задачи коммивояжера

#### Постановка задачи

Для графа, заданного на рис. 9.2, выполнить решение задачи коммивояжера.

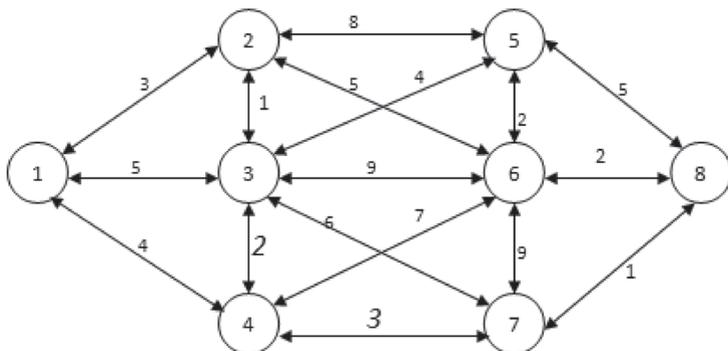


Рис. 9.2. Исходный граф для решения задачи коммивояжера

### Математическая модель

Целевая функция имеет вид:

$$\begin{aligned} & (3x_{1,2} + 5x_{1,3} + 4x_{1,4}) + (3x_{2,1} + x_{2,3} + 8x_{2,5} + x_{2,6}) + \\ & + (5x_{3,1} + x_{3,2} + 2x_{3,4} + 4x_{3,5} + 9x_{3,6} + 6x_{3,7}) + (4x_{4,1} + 2x_{4,3} + 7x_{4,6} + 3x_{4,7}) + \\ & + (8x_{5,2} + 4x_{5,3} + 2x_{5,6} + 5x_{5,8}) + (5x_{6,2} + 9x_{6,3} + 7x_{6,4} + 2x_{6,5} + 9x_{6,7} + 2x_{6,8}) + \\ & + (6x_{7,3} + 3x_{7,4} + 9x_{7,6} + x_{7,8}) + (5x_{8,5} + 2x_{8,6} + x_{8,7}) \rightarrow \min \end{aligned}$$

$$\sum_{j=1}^8 x_{ij} = 1 (i = \overline{1,8})$$

В каждый пункт назначения входит один, и только один, путь:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{21} + x_{31} + x_{41} = 1 \\ x_{12} + x_{32} + x_{52} + x_{62} = 1 \\ x_{13} + x_{23} + x_{43} + x_{53} + x_{63} + x_{73} = 1 \\ x_{14} + x_{34} + x_{64} + x_{74} = 1 \\ x_{25} + x_{35} + x_{65} + x_{85} = 1 \\ x_{26} + x_{36} + x_{46} + x_{56} + x_{76} + x_{86} = 1 \\ x_{37} + x_{47} + x_{77} + x_{87} = 1 \\ x_{58} + x_{68} + x_{78} = 1 \end{array} \right.$$

Из каждого пункта отправления выходит только один маршрут:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{12} + x_{13} + x_{14} = 1 \\ x_{21} + x_{23} + x_{25} + x_{26} = 1 \\ x_{31} + x_{32} + x_{34} + x_{35} + x_{36} + x_{37} = 1 \\ x_{41} + x_{43} + x_{46} + x_{47} = 1 \\ x_{52} + x_{53} + x_{56} + x_{58} = 1 \\ x_{62} + x_{63} + x_{64} + x_{65} + x_{67} + x_{68} = 1 \\ x_{73} + x_{74} + x_{77} + x_{78} = 1 \\ x_{85} + x_{86} + x_{87} = 1 \end{array} \right.$$

### Решение задачи

В качестве произвольного маршрута определим:

$$X_0 = (1,2); (2,3); (3,4); (4,5); (5,6); (6,7); (7,8); (8,1).$$

Тогда  $F(X_0) = 3 + 1 + 2 + \infty + 2 + 9 + 1 + \infty = 18$ .

Для определения нижней границы множества приведем матрицу по строкам, для этого находим в каждой строке матрицы минимальный элемент.

i j	1	2	3	4	5	6	7	8	min
1	$\infty$	3	5	4	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	3
2	3	$\infty$	1	$\infty$	8	5	$\infty$	$\infty$	1
3	5	1	$\infty$	2	4	9	6	$\infty$	1
4	6	$\infty$	2	$\infty$	$\infty$	7	3	$\infty$	2
5	$\infty$	8	4	$\infty$	$\infty$	2	$\infty$	5	2
6	$\infty$	5	9	7	2	$\infty$	9	2	2
7	$\infty$	$\infty$	6	3	$\infty$	9	$\infty$	1	1
8	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	5	2	1	$\infty$	1

Затем вычитаем найденные минимумы из элементов рассматриваемой строки.

i j	1	2	3	4	5	6	7	8
1	$\infty$	0	2	1	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
2	$\infty$	$\infty$	0	$\infty$	7	4	$\infty$	$\infty$
3	4	0	$\infty$	1	3	8	5	$\infty$
4	4	$\infty$	0	$\infty$	$\infty$	5	$\infty$	$\infty$
5	$\infty$	6	$\infty$	$\infty$	$\infty$	0	$\infty$	3
6	$\infty$	3	7	5	0	$\infty$	7	0
7	$\infty$	$\infty$	$\infty$	2	$\infty$	$\infty$	$\infty$	0
8	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	4	1	0	$\infty$

Далее приводим по столбцам, для чего в каждом столбце находим минимальный элемент:

i j	1	2	3	4	5	6	7	8
1	$\infty$	0	2	1	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
2	$\infty$	$\infty$	0	$\infty$	7	4	$\infty$	$\infty$
3	4	0	$\infty$	1	3	8	5	$\infty$
4	4	$\infty$	0	$\infty$	$\infty$	5	$\infty$	$\infty$
5	$\infty$	6	$\infty$	$\infty$	$\infty$	0	$\infty$	3
6	$\infty$	3	7	5	0	$\infty$	7	0
7	$\infty$	$\infty$	$\infty$	2	$\infty$	$\infty$	$\infty$	0
8	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	4	1	0	$\infty$
min	2	0	0	1	0	0	0	0

После вычитания минимальных элементов получаем новую матрицу.

i j	1	2	3	4	5	6	7	8
1	$\infty$	0	2	0	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
2	$\infty$	$\infty$	0	$\infty$	7	4	$\infty$	$\infty$
3	2	0	$\infty$	0	3	8	5	$\infty$
4	2	$\infty$	0	$\infty$	$\infty$	5	$\infty$	$\infty$
5	$\infty$	6	$\infty$	$\infty$	$\infty$	0	$\infty$	3
6	$\infty$	3	7	4	0	$\infty$	7	0
7	$\infty$	$\infty$	$\infty$	1	$\infty$	$\infty$	$\infty$	0
8	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	4	1	0	$\infty$

Сумма найденных минимальных элементов определяет нижнюю границу  $Q$ :

$$Q(0) = (3 + 1 + 1 + 2 + 2 + 2 + 1 + 1) + (2 + 0 + 0 + 1 + 0 + 0 + 0 + 0) = 16$$

Определим ребро ветвления и разобьем все множество маршрутов относительно этого ребра на два подмножества  $(i, j)$  и  $(i^*, j^*)$ .

С этой целью для всех клеток матрицы с нулевыми элементами заменяем поочередно нули на  $\infty$  (бесконечность) и определяем для них сумму образовавшихся констант приведения.

i j	1	2	3	4	5	6	7	8
1	$\infty$	0(0)	2	0(0)	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
2	0(0)	$\infty$	0(1)	$\infty$	7	4	$\infty$	$\infty$
3	2	0(0)	$\infty$	0(0)	3	8	5	$\infty$
4	2	$\infty$	0(0)	м	$\infty$	5	$\infty$	$\infty$
5	$\infty$	6	$\infty$	$\infty$	$\infty$	0(1)	$\infty$	3
6	$\infty$	3	7	4	0(1)	$\infty$	7	0(0)
7	$\infty$	$\infty$	$\infty$	1	$\infty$	$\infty$	$\infty$	0(2)
8	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	4	1	0(3)	$\infty$

Наибольшая сумма констант приведения равна  $(3 + 0) = 3$  для ребра (8,7), следовательно, множество разбиваем на два подмножества (8,7) и (8\*,7\*).

Нижняя граница гамильтоновых циклов этого подмножества:

$$H(8^*,7^*) = 16 + 3 = 19.$$

Исключение ребра (8,7) проводим путем замены элемента 8,7 = 0 на  $\infty$ , после чего осуществляем очередное приведение матрицы расстояний для образовавшегося подмножества (8\*,7\*), в результате получаем матрицу.

i j	1	2	3	4	5	6	7	8	min
1	$\infty$	0	2	0	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
2	$\infty$	$\infty$	0	$\infty$	7	4	$\infty$	$\infty$	$\infty$
3	2	0	$\infty$	0	3	8	5	$\infty$	$\infty$
4	2	$\infty$	0	$\infty$	$\infty$	5	$\infty$	$\infty$	$\infty$
5	$\infty$	6	$\infty$	$\infty$	$\infty$	0	$\infty$	3	0
6	$\infty$	3	7	4	0	$\infty$	7	0	0
7	$\infty$	$\infty$	$\infty$	1	$\infty$	$\infty$	$\infty$	0	0
8	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	4	1	$\infty$	$\infty$	$\infty$
min	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	0	0	0	$\infty$	$\infty$

Включаем ребро (8,7), исключая все элементы 8-й строки и 7-го столбца, а элемент 7,8 заменяем на  $\infty$  для исключения образования негамильтонова цикла. В результате получаем следующую сокращенную матрицу:

i j	1	2	3	4	5	6	8	min
1	$\infty$	0	2	0	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
2	$\infty$	$\infty$	0	$\infty$	7	4	$\infty$	$\infty$
3	2	0	$\infty$	0	3	8	$\infty$	$\infty$
4	2	$\infty$	0	$\infty$	$\infty$	5	$\infty$	$\infty$
5	$\infty$	6	$\infty$	$\infty$	$\infty$	0	3	0
6	$\infty$	3	7	4	0	$\infty$	0	0
7	$\infty$	$\infty$	$\infty$	1	$\infty$	$\infty$	0	0
min	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	0	0	3	1

Сумма констант приведения сокращенной матрицы равна 1. Нижняя граница подмножества (8,7) равна:

$$H(8,7) = 16 + 3 = 19 < 19.$$

Поскольку нижняя граница этого подмножества (8,7) меньше, чем подмножества (8\*,7\*), то ребро (8,7) включаем в маршрут.

Определяем следующее ребро ветвления.

i j	1	2	3	4	5	6	8
1	$\infty$	0	2	0(0)	$\infty$	$\infty$	$\infty$
2	0	$\infty$	0(1)	$\infty$	1	6	$\infty$
3	2	0(0)	$\infty$	4	1	3	$\infty$
4	2	$\infty$	0	$\infty$	$\infty$	1	$\infty$
5	$\infty$	6	2	$\infty$	$\infty$	0(1)	3
6	$\infty$	3	7	4	0(1)	$\infty$	0
7	$\infty$	$\infty$	5	1	$\infty$	8	0

Так как наибольшая сумма констант совпадает, то выберем одну из них, например, для ребра (6,5), следовательно, множество

разбивается на два подмножества (6,5) и (6\*,5\*). Нижняя граница гамильтоновых циклов этого подмножества:

$$H(6^*,5^*) = 16 + 2 = 18.$$

Аналогичные преобразования приводят к оптимальному решению:

$$x_{87}^* = x_{65}^* = x_{41}^* = x_{56}^* = x_{68}^* = x_{13}^* = x_{32}^* = x_{25}^* = 1; x_0 = 37$$

Представим решение на графе (рис. 9.3).

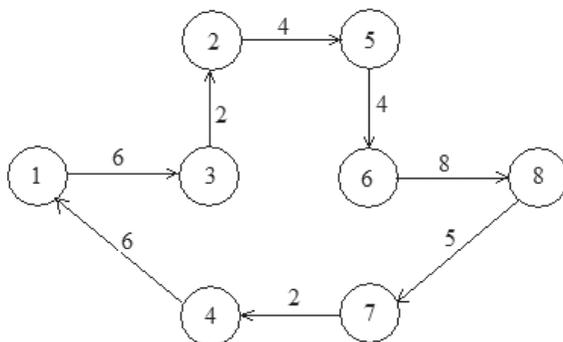


Рис. 9.3. Результаты решения задачи коммивояжера

Один из практических решений этой задачи будет подробно рассмотрен в главе 11.

## Глава 10

### Экспертно-аналитические системы

Из предыдущих глав ясно, что моделирование логистических операций в арктических морях сталкивается с рядом методологических трудностей. Одним из возможных путей частичного разрешения перечисленных выше проблем являются экспертные технологии, которые широко применяются в задачах выбора оптимальных решений и не только в них [Айзерман, Алескеров, 1990; Блюмин, Шуйкова, 2001; Коробов, Тутыгин, 2010; Литвак, 2004; Ломазов, Ломазов, Петросов, 2015; Орлов, 2010 и др.].

Экспертные технологии состоят из двух частей: процедур проведения экспертных опросов и нахождения числовых характеристик параметров системы – в нашем случае, моделей, рассчитываемых на основании полученных в ходе опросов экспертных суждений [Коробов, 2019]. В такой последовательности мы их и рассмотрим, касаясь только наиболее важных вопросов.

Обычно экспертные опросы разделяют на две большие группы: групповые и индивидуальные. Целью групповых методов является выработка наиболее *согласованного* решения. Подчёркиваем: не оптимального, а наиболее согласованного. По нашему мнению, это принципиально неверная цель. И вот почему.

*Во-первых*, групповые оценки всегда деформированы вследствие эффектов Стоунера [Stoner, 1967], установившего, что группа имеет свойство идти на уровень риска, предложенным самым «рискованным» её членом, и Джаниса (его ещё называют Groupthink – группомыслие) [Janis, 1982], показавшего, что при групповых обсуждениях возрастает вероятность желательного решения и снижается вероятность нежелательного, что крайне важно при принятии управленческих решений.

*Во-вторых*, на мнение группы может влиять её лидер, использующий свой авторитет для подавления не совпадающих с его мнением суждений. А если в составе группы окажутся люди, склонные к конформизму, что часто имеет место при коллективных обсуждениях, то эффект лидера будет проявляться ещё более сильно.

*В-третьих*, в составе группы некоторая часть может объединиться для проведения именно своей идеи или же для протеста лидеру. Практика показывает, что сплочённое меньшинство более эффективно, чем разрозненное большинство, и во многих случаях именно точка зрения меньшинства становится доминирующей.

*В-четвёртых*, нежелание идти на компромисс при поляризации суждений. Тогда ни о какой согласованности суждений, а, напомним, это и является главной целью групповых обсуждений, не может быть и речи. В таком случае результаты экспертного опроса не могут быть использованы по назначению.

К этому необходимо упомянуть ещё несколько факторов, деформирующих результаты групповых обсуждений, а именно: влияние организаторов опроса на группу, эффект пола, проявляю-

щийся, когда женщины/мужчины составляют явное меньшинство, ярко выраженные возрастные и социальные различия и некоторые другие.

Интересно, что отличие групповых решений от индивидуальных в среде профессионалов было отмечено более ста лет назад французским психологом Гюставом Лебоном, давшим этому явлению множество подтверждений [Лебон, 2018].

Положительный момент групповых обсуждений, пожалуй, только один: возможность корректировать свои суждения от получаемой в ходе обсуждения неизвестной до этого эксперту информации и аргументов оппонентов во время дискуссии. Но это преимущество можно сильно снивелировать, если при других формах опроса перед их началом подготовить аналитическую записку для экспертов, содержащую в себе подробное изложение проблемы и её особенность в данном конкретном случае.

Индивидуальные опросы, хотя и занимают больше времени, свободны от перечисленных выше недостатков. К тому же такая форма опроса позволяет привлечь большее количество экспертов, которые не могут в требуемый момент времени принять участие в групповом обсуждении, а это может иметь решающее значение.

Поскольку оба подхода не без недостатков, предпринимаются попытки объединения этих технологий. Наиболее известными из них являются методы номинальных групп и Дельфы, но мы не будем их подвергать разбору, который можно найти в многочисленной литературе. Отметим только, что и в них не удаётся избежать эффектов, свойственных групповым опросам, а всего лишь свести их к меньшим проявлениям. Поэтому в дальнейших своих исследованиях для нахождения коэффициентов значимости мы будем проводить индивидуальные опросы экспертов.

Технические процедуры получения весовых коэффициентов и коэффициентов значимости имеют свои особенности. Рассмотрим наиболее важные из них.

*Прямая расстановка.* Представляет собой наиболее простой и понятный метод: каждому фактору присваивается некоторое числовое значение в соответствии с определёнными требованиями. Для коэффициентов значимости используется шкала, верхний предел которой не ограничивается, например, от 0.1 до 1. Соответ-

ственно, каждому показателю экспертами присваиваются значения 0.1, 0.2, ..., 1.0. Для весовых коэффициентов должно выполняться требование равенства их суммы единице или 100%. В этом заключается принципиальное различие между коэффициентами значимости и весовыми коэффициентами: первые показывают соотношения между факторами, вторые – вклад фактора в конечный результат. Однако при расстановке весовых коэффициентов у экспертов возникают сложности, обусловленные необходимостью постоянно контролировать суммы, которые нарастают с ростом числа факторов, вследствие чего процесс становится итерационным. При этом не совсем понятно, по каким правилам проводить итерации. Поэтому для нахождения весовых коэффициентов разработаны и другие методы, в то время как для коэффициентов значимости прямой расстановки вполне достаточно.

*Ранжирование.* Этот подход, пожалуй, наиболее популярный ввиду своей простоты и ясности интерпретации. Как следует из названия метода, факторы выстраиваются в порядке важности, образуя возрастающий или, наоборот, убывающий ряд. При равенстве двух и более факторов им присваиваются одинаковые ранги [Химмельблау, 1973]. Расчёт весовых коэффициентов  $k_i$  осуществляется по формуле

$$k_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i},$$

где  $r_i$  – ранг фактора;  $n$  – число факторов.

*Метод анализа иерархий (МАИ).* Этот метод, основанный на парных сравнениях факторов, разработан американским математиком Томасом Саати и является одним из самых популярных и применяемых методов многокритериального оценивания. Сущность метода заключается в сравнении всех факторов между собой по парам по специальной шкале (табл. 10.1) [Саати, 2009], где каждому суждению сопутствует пояснение.

При помощи этой шкалы, номера строк которой используются для кодирования парных сравнений числами от 1/9, 1/8 ... до 9, составляется обратносимметричная матрица парных сравнений (табл. 10.2).

Таблица 10.1

## Иерархия экспертных сравнений соотношения факторов

№	Суждение	Пояснение
1	Равная предпочтительность	Две альтернативы одинаково предпочтительны с точки зрения цели
2	Слабая степень предпочтения	Промежуточная градация между равным и средним предпочтением
3	Средняя степень предпочтения	Опыт эксперта позволяет считать одну из альтернатив немного предпочтительнее другой
4	Предпочтение выше среднего	Промежуточная градация между средним и умеренно сильным предпочтением
5	Умеренно сильное предпочтение	Опыт эксперта позволяет считать одну из альтернатив явно предпочтительнее другой
6	Сильное предпочтение	Промежуточная градация между умеренно сильным и очень сильным предпочтением
7	Очень сильное (очевидное) предпочтение	Опыт эксперта позволяет считать одну из альтернатив гораздо предпочтительнее другой: доминирование альтернативы подтверждено практикой
8	Очень, очень сильное предпочтение	Промежуточная градация между очень сильным и абсолютным предпочтением
9	Абсолютное предпочтение	Очевидность подавляющей предпочтительности одной альтернативы над другой имеет неоспоримое подтверждение

Таблица 10.2

## Шаблон матрицы парных сравнений

Номер фактора	1	...	k	...	n
1	1	$a_{ij}$	$a_{ij}$	$a_{ij}$	$a_{in}$
...	$a_{ji}$	1	$a_{ij}$	$a_{ij}$	$a_{in}$
k	$a_{ji}$	$a_{ji}$	1	$a_{ij}$	$a_{in}$
...	$a_{ji}$	$a_{ji}$	$a_{ji}$	1	$a_{in}$
n	$a_{jn}$	$a_{jn}$	$a_{jn}$	$a_{jn}$	1

В МАИ «встроен» критерий качества работы эксперта, основанный на сравнении полученных результатов с неким «идеальным» экспертом – так называемое «отношение согласованности», что даёт возможность исключать из рассмотрения суждения, отклоняющиеся от «идеальных» на некую величину. По рекомендации автора метода, эта величина не должна выходить за пределы 10%, что представляется нам достаточно жёстким требованием.

Однако, как показывают многочисленные исследования, в том числе и авторов данной работы [Коробов, Тутьгин, 2010; Коробов, Тутьгин, 2016; Коробов, 2013; Коробов, 2019; Мощенко, Пирогов, 2017; Павлов, Перегудов, 2013 и др.], этот метод далеко не безупречен. Чтобы это проиллюстрировать, остановимся на некоторых, наиболее ярко выраженных его недостатках.

*Первое.* Линейность и инвариантность шкалы парных сравнений. Метод использования этой шкалы для кодирования по своей сути является ранговым, в том смысле, что расстояние между строками, как в стандартных ранговых шкалах, равно единице. Это предполагает, что различия между парами будет кратным целому числу. Но как только мы переходим к обратным величинам, что имеет место при направлении (имеет значение, как выбирается, что с чем мы сравниваем:  $A$  с  $B$ , или  $B$  с  $A$ ) оценки факторов в паре и происходит автоматически в обратносимметричных матрицах, этот принцип, а значит соотношение между парами, уже не соблюдается.

*Второе:* «Идеальный» эксперт таковым не является. Для соответствия «идеалу» в качестве основного используется индекс согласованности (ИС), который и сравнивается с таким же индексом, полученным на основании массовых расчётов. ИС суждения эксперта довольно просто вычисляется по формуле:

$$ИС = \frac{\lambda - n}{n - 1}, \quad (10.1)$$

где  $\lambda$  – максимальное собственное число матрицы парных сравнений;  
 $n$  – число сравниваемых факторов.

Но наши численные эксперименты с матрицей парных сравнений [Коробов, Тутьгин, 2010] привели к парадоксальному результату: чем выше транзитивность матрицы, тем хуже её согла-

сованность. Поскольку Саати массовых опросов не проводил, а использовал результаты стохастического моделирования, был сделан и обоснован вывод об ошибочности принятой им статистической модели.

*Третье.* Требование транзитивности матрицы парных сравнений, как бы заложенное в выражении (10.1), само по себе слишком жёсткое. Мало того, оно далеко не всегда имеет место в сложных системах с неявно выраженными предпочтениями. Но именно на идее строгой транзитивности, как часто утверждается, построен критерий качества работы эксперта.

Отклонение главного собственного значения матрицы суждений от ее размерности может служить лишь для согласования матриц между собой. Только для полностью согласованных матриц их ИС равны [Мощенко, Пирогов, 2017; Павлов, Перегудов, 2013], а такое можно встретить лишь в теории или же в случаях очень и очень жестко формализованных и структурированных задач.

Для полноты картины упомянем и о некоторых других подходах расчёта весовых коэффициентов: парное сравнение векторов признаков по некоторым правилам на основе булевой алгебры, прямой расчёт по числовым характеристикам полей показателей факторов, по частоте встречаемости или предпочтительности фактора и так далее. Но все они уступают по популярности перечисленным выше методам.

На наш взгляд, из всех методов нахождения весовых коэффициентов с использованием экспертных технологий наибольшими преимуществами обладает ранжирование. Во-первых, ранжировать ряды признаков по установленным правилам не составляет труда. Эту процедуру можно осуществлять последовательно, находя наиболее соответствующее место каждому фактору среди других. Во-вторых, весовые коэффициенты рассчитываются по элементарной формуле в зависимости от ранга фактора. В-третьих, на метод не накладываются жёстких требований, таких как, например, в МАИ. В-четвёртых, как показано в работе В.Б. Коробова [Коробов, 2005 (б)], найденные таким способом весовые коэффициенты высоко коррелированы с МАИ и прямой расстановкой. А если то же самое можно сделать проще, то зачем усложнять себе задачу?

*Сети.* В последние годы для исследования сложных объектов широко используются сети: нейронные, аналитические, а также си-

стемы искусственного интеллекта, в которых сети могут быть одной из составляющих систему элементов. Для нас сети представляют тот интерес, что с их помощью можно уточнить первоначальные коэффициенты значимости и весовые коэффициенты. Смысл сетевого подхода заключается в учёте не только прямых, но и косвенных, а также опосредованных связей между компонентами системы. Для оценки этих связей также широко используются экспертные технологии, на которых мы подробно останавливаться не будем.

Перераспределение коэффициентов в сетях влечёт за собой если и не изменение, то корректировку конечного результата. Так, использование аналитической сети в задаче оптимального выбора места размещения береговых баз аварийного реагирования для ликвидации разливов нефти при танкерных перевозках нефти по Белому морю позволило существенно точнее предложить точки их расположения на побережье Двинского залива [Коробов, Середкин, 2016]. Принимая во внимание большие скорости течений, выигрыш всего лишь в несколько десятков минут может иметь решающее значение для масштаба загрязнения берегов, а то и предотвратить их.

*Усреднение коэффициентов.* Поскольку в экспертных опросах участвуют многие специалисты – в некоторых опросах до 60 человек [Диксон, 2004], результаты опросов необходимо усреднять. При групповых опросах эта процедура происходит в рамках общей технологии и может иметь свои особенности. В случае индивидуальных опросов усреднение имеет самостоятельное значение, поскольку усредняются конечные результаты, а именно коэффициенты. При этом достаточно использовать среднее арифметическое, которое с заведомой точностью достаточно для практических приложений [Коробов, 2008].

В то же время процедура усреднения качественных признаков, которые могут являться частью общей технологии, требует особого внимания и разработки специальных алгоритмов, поскольку в чистом виде, как в МАИ, может оказаться вообще некорректной [Петровский, 2009].

Чаще всего коэффициенты в моделях, в том числе и сетевых, используются как постоянные. Но это не всегда оправдано, когда условия реализации модели существенно меняются. Тогда они должны зависеть от некоторого влияющего на них параметра.

В таких случаях не составляет труда попросить экспертов высказать свои суждения относительно важности факторов не по всему объекту исследований, как это обычно делается, а по его составляющим – в данном случае, участкам трассы и пунктам погрузочно-разгрузочных операций. Особенно важна такая оценка при одновременном использовании разных способов выгрузки, например, вертолётом и плашкоутами [Есеев, Коробов, Макаров, Матвеев, Тутыгин, 2017]. Тогда коэффициенты значимости и весовые коэффициенты становятся уже не константами, а переменными параметрами моделей.

Рассмотрим [Тутыгин, Антипов, Коробов, 2019], как меняется методология расчетов на простой модели балльных классификаций:

$$I_i = \sum_{j=1}^n k_{ij} p_{ij}, \quad (10.2)$$

где  $I_i$  – некий интегральный показатель,  $k_{ij}$  – весовые коэффициенты (или коэффициенты значимости) факторов,  $p_{ij}$  – показатели факторов,  $i = 1, \dots, m$  – число участков,  $j = 1, \dots, n$  – число факторов.

При динамическом моделировании коэффициенты значимости (и весовые коэффициенты также) становятся зависимыми от некоторого, вообще говоря, дискретного параметра  $t$ , который может обозначать применительно к условиям решаемой задачи время (сезон), новую ситуацию, индекс события в определенной логической цепи (последовательности) событий, т.е.  $k = k(t)$ . Следовательно, для каждого случая коэффициенты значимости и весовые коэффициенты в формате «участки  $\times$  факторы» должны определяться по-новому, что превращает (10.2) в матричное выражение (10.3):

$$A = (a_{st})_{m \times m} = K \cdot P' = \left( \sum_{j=1}^n k_{sj} p'_{jt} \right), \quad P' \text{ – операция транспонирования (10.3).}$$

где  $K = (k_{ij})_{m \times n}$ ,  $P = (p_{ij})_{m \times n}$ ,  $p'_{ji} = p_{ij}$

Так как в матрице  $A$  недиагональные элементы  $a_{st}$  ( $s \neq t$ ) не имеют какой-либо содержательной трактовки, то, заменив их нулями, перейдем к матрице  $\tilde{A} = (\tilde{a}_{st})_{m \times m}$ , где

$$\tilde{a}_{st} = \begin{cases} I_i = \sum_{j=1}^n k_{ij} p'_{ji}, \text{ если } s = t = i \\ 0 - \text{ в противном случае} \end{cases} \quad (10.4)$$

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^n k_{1j} p'_{j1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sum_{j=1}^n k_{2j} p'_{j2} & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \sum_{j=1}^n k_{mj} p'_{jm} \end{pmatrix}$$

или в векторном виде:  $I = (I_1, I_2, \dots, I_m) = \text{diag } A = \text{diag}(K \cdot P')$ .

Таким образом, вектор-функция  $I = I(t)$  описывает траекторию состояний объекта в некотором фазовом пространстве [Тутыгин, Коробов, Чинова, Малинина, 2018].

В моделях балльных классификаций параметр  $k_i$  будет принимать значения в интервале  $[0, 1]$ , в других моделях, например, в задаче коммивояжёра, при оптимизации маршрута прохождения судна по времени соответствующий множитель может иметь вид  $1 + \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – некоторая случайная величина, принимающая достаточно малые значения либо нечёткое число [Заде, 1976], представляющий собой нормированную сумму весовых коэффициентов или коэффициентов значимости.

## Часть 4

### ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В АЗРФ

В этой части рассмотрим ряд примеров практической реализации изложенных в предыдущих главах некоторых моделей и методологий. Все случаи получены в разные годы самими авторами или при непосредственном их участии при решении задач оптимизации логистических операций и размещения объектов нефтяной транспортной инфраструктуры в АЗРФ.

## Глава 11

### Оптимизация морских перевозок

В этой главе покажем, как может быть реализована на практике задача коммивояжёра, основы которой изложены в главе 9.

В самом простом виде условие оптимизации в задаче коммивояжёра можно записать как [Гордеева, Самойлова, 2018]

$$S = \sum_{i,j} c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (11.1)$$

где  $S$  – интегральный показатель оптимизации, характеризующий затраты на прохождение маршрута.

Затраты определяются из особенностей задачи: транспортных средств, условий эксплуатации и других факторов, влияющих на определение стоимости. Применительно к данному случаю, методология расчёта интегрального показателя разработана Е.О. Антиповым. Заключается она в следующем.

По признаку выражения показатели классифицируются на натуральные и стоимостные. Под натуральными показателями понимаются те, которые измеряются в натуральных единицах из-

мерения. К ним относятся: общее количество груза, количество пунктов доставки, параметрические характеристики унифицированной грузовой единицы (УГЕ).

Стоимостные показатели отображают совокупность разнородных и однородных хозяйственных явлений, выраженных в денежном эквиваленте, таких как: затраты на рейс, затраты на грузовые операции, затраты на фрахт судна.

Показатели также классифицируются как объемные и удельные. Объемные показатели отображают объем экономического явления. Применительно к нашему исследованию можно выделить объем доставленного груза. Удельные выражаются через объемные. Таким образом, можно выделить: затраты на 1 км пути, затраты на одну грузовую операцию, затраты на одну УГЕ, затраты на один пункт доставки, затраты на участок маршрута, затраты на одну группу портов [Безруков, 2018].

Однако с учетом выявленных особенностей транспортно-технологических систем (ТТС) АЗРФ имеющаяся группировка показателей представляется недостаточной, поскольку не позволяет оценить ТТС в полной мере. Поэтому предлагается ввести несколько дополнительных группировок показателей экономической оценки.

Поскольку генеральная совокупность показателей экономической оценки многообразна и разнородна, к первой группе показателей принадлежат экономико-технологические показатели, которые характеризуют себестоимость доставки единицы УГЕ, так как УГЕ – краеугольный камень любой ТТС [Рачковская, 2018], и от стоимости ее доставки напрямую зависит прибыльность ТТС.

Таким образом, исходя из выбранного признака показателей, расчет себестоимости доставки единицы УГЕ рассчитывается по следующей формуле:

$$C_{IUL} = \frac{V_{IUL} / C_t}{N_{IUL}} \quad (11.2)$$

где  $V_{IUL}$  – объем перевозимых УГЕ в штуках;  $N_{IUL}$  – количество УГЕ в штуках;  $C_t$  – себестоимость рейса, которая рассчитывается по формуле

$$C_t = \sum_n C_n + \sum_n C_{n(0-1)} \quad (11.3)$$

где  $C_n$  – затраты в пункте назначения в рублях, которая рассчитывается по формуле:

$$C_n = \sum_n T_c * C_f + \sum_n C_{tx} \quad (11.4)$$

где  $T_c$  – продолжительность грузовой операции, включая задержки в сутках;  $C_f$  – себестоимость суток фрахта в рублях за сутки;  $C_{tx}$  – затраты на портовые сборы в рублях.

В формуле (11.3)  $C_{n(0-1)}$  – затраты на прохождение участка маршрута между пунктами в рублях, которые рассчитываются по формуле:

$$C_{n(0-1)} = \sum_n T_p * C_f + \sum_n C_i \quad (11.5)$$

где  $T_p$  – время прохождения участка в сутках, включающее задержки;  $C_i$  – затраты на ледовую проводку.

Вторая группа показателей основана на учёте природных и климатических условий, среди них: температура окружающей среды; ветровой режим; уровень и вид ледовитости; погодные условия.

Третьей группой являются эксплуатационные характеристики судна и перевозимых грузов, характеризующие технические показатели, среди них: ледовый класс судна; характеристики грузовых устройств; нормативная скорость судна; грузовая вместимость судна, как весовая, так и объемная; характеристика груза, как весовая, так и объемная; характеристика УГЕ, как весовая, так и объемная.

Таким образом, в результате выполненного исследования показателей экономической оценки ТТС АЗРФ получена следующая таблица (табл. 11.1).

Следует отметить, что достаточно сложно доказать референтность второй группы показателей. Обусловлено это отсутствием специального статистического наблюдения [Toyasaki, Wakolbinger, Kettinger, 2013], которое позволяло бы выявлять корреляционные зависимости, на основе которых можно описать или присвоить какое-либо значение показателю. При этом отдельные блоки показателей, зависящих от природных факторов, можно определить с помощью экспертно-аналитических методов и применять способ ранжирования показателей, на основе которого присвоить ранг каждому из природных факторов [Коробов, 2004].

Таблица 11.1

## Показатели экономической оценки ТТС АЗРФ

Название группы показателей	Экономико-технологические	Природные	Технические
Показатели	Себестоимость доставки 1 УГЕ. Себестоимость рейса. Затраты в пункте доставки. Себестоимость грузовой операции. Себестоимость суток фрахта. Затраты на портовые сборы. Затраты на прохождение участка маршрута. Затраты на ледовую проводку	Температура окружающей среды. Ветровой режим. Уровень и вид ледовитости. Погодные условия	Ледовый класс судна. Характеристики грузовых устройств. Нормативная скорость судна. Грузовая вместимость судна, как весовая, так и объемная. Характеристика груза, как весовая, так и объемная характеристика УГЕ, как весовая, так и объемная

Также в результате исследования показателей экономической оценки ТТС АЗРФ отмечена иерархическая зависимость первой группы от второй и третьей. При этом экономико-технологические показатели воздействуют на ТТС изнутри, а технические и природные показатели – из внешней среды. Обусловлено это иерархическим превосходством натуральных и описательных показателей над стоимостными, так как вторые происходят из первых (рис. 11.1).

Таким образом, исследованные показатели экономической оценки ТТС АЗРФ позволяют включить их в модель экономической оценки. Рассмотрим данный алгоритм для повышения эффективности северного завоза.

На ТТС оказывают влияние большое количество факторов: географо-экологические, социальные, транспортно-экономические и транспортно-технологические [Кондратьева, Степанова, Трубина, Луковцева, 2018]. Учесть их в задачах принятия решения достаточно сложно, поскольку их показатели в различных ситуациях проявляются различно. Поэтому такого рода задачи относятся к классу проблем, не имеющих точного решения.

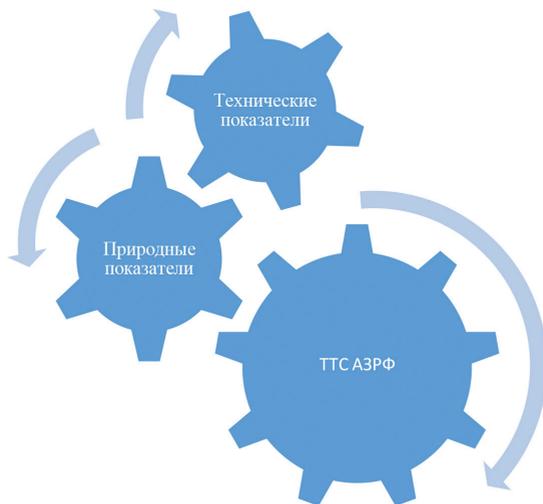


Рис. 11.1. Влияния групп показателей на ТТС АЗРФ

На практике в этих целях широко применяется моделирование транспортных процессов. Подходы к составлению и реализации моделей могут быть самые разные, как и используемые типы самих моделей. Рассмотрим наиболее общие подходы к составлению моделей и проблемы, связанные с их реализацией. При этом будет принято во внимание, каким образом эти модели вписываются в концепцию «Интернета вещей», становящуюся в настоящее время новой научной парадигмой, приходящей на смену парадигме информационного общества.

Моделирование основывается на подобии систем или процессов, которое может быть полным или частичным. Степень полноты подобия логистических моделей моделируемым объектам – существенная характеристика любой модели – выбрана первым признаком классификации. По этому признаку все модели можно разделить на изоморфные и гомоморфные [Левченко, Рычкова, Смирнов, 2016].

Изоморфные модели – это модели, включающие все характеристики объекта-оригинала, способные, по существу, заменить его. Если можно создать и наблюдать изоморфную модель, то наши знания о реальном объекте будут точными. В этом случае мы сможем точно предсказать поведение объекта.

В основе гомоморфных моделей лежит неполное подобие модели изучаемому объекту, частичное подобие. При этом некоторые стороны функционирования реального объекта не моделируются совсем. В результате упрощается построение модели и интерпретация результатов исследования. При моделировании логистических систем абсолютное подобие не имеет места. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать лишь гомоморфные модели, не забывая, однако, что степень подобия у них может быть различной.

Следующим признаком классификации является материальность модели. В соответствии с этим признаком все модели можно разделить на материальные и абстрактные. Материальные модели воспроизводят основные геометрические, физические, динамические и функциональные характеристики изучаемого явления или объекта. К этой категории относятся, в частности, уменьшенные макеты предприятий оптовой торговли, позволяющие решить вопросы оптимального размещения оборудования и организации грузовых потоков.

Абстрактное моделирование часто является единственным способом моделирования в логистике. Его подразделяют на символическое и математическое.

К символическим моделям относят языковые и знаковые. Языковые модели – это словесные модели, в основе которых лежит набор слов (словарь), очищенных от неоднозначности. Этот словарь называется «тезаурус». В нем каждому слову может соответствовать лишь единственное понятие, в то время как в обычном словаре одному слову могут соответствовать несколько понятий.

Знаковые модели. Если ввести условное обозначение отдельных понятий, т. е. знаки, а также договориться об операциях между этими знаками, то можно дать символическое описание объекта.

Рассмотрим несколько подробнее подходы к математическому моделированию. Математическим моделированием называется процесс установления соответствия данному реальному объекту некоторого математического объекта, называемого математической моделью. В логистике широко применяются два вида математического моделирования: аналитическое и имитационное.

Аналитическое моделирование – это математический прием исследования логистических систем, позволяющий получать точные решения.

Имитационное моделирование – это инструмент для построения и оптимизации бизнес-процессов на основе анализа виртуальной модели. Эта технология позволяет проанализировать динамику процессов везде, где есть большие потоки людей, транспорта, продукции или сырья.

Сетевое моделирование – метод математического моделирования, при котором используется графическое изображение взаимосвязей с помощью теории графов. Данный метод наиболее удобен для описания и анализа сложных процессов ввиду наглядного представления бизнес-процессов, что способствует восприятию взаимосвязи работ в системе.

Одной из отличительных особенностей этого метода является определение видов связей между процессами и работами, их порядок и взаимоисключение. В рамках сетевого моделирования выделяют: жесткие, мягкие и ресурсные связи.

Жесткие связи, или технологические, позволяют задать строгую последовательность выполнения работ, ограничиваемую технологиями или логикой использования и преобразования информации, получаемую в ходе выполнения работ. Базовым принципом построения жестких связей между процессами является строгая последовательность выполнения, при невыполнении которой появляются дополнительные затраты по причине потери актуальности выбранной технологии.

Мягкие связи, которые также принято называть организационными, как и жесткие, являются частью технологии, но несоблюдение очередности действий не приведет к появлению дополнительных процессов, хотя приведет к изменению организационной структуры. Данный тип связи подразумевает повторение технологического процесса в сложившейся последовательности действий без необходимости дополнительной координации или планирования действий.

Ресурсные связи используются в условиях наличия ресурса в единственном экземпляре, который не способен одновременно выполнять несколько видов работ одновременно. Такие связи вводятся, например, при наличии одного разгрузочного средства на причале, что позволяет получить достоверную оценку продолжительности и затрат на работу.

В советский период функционирование транспортных систем было возможно по причине социалистической надстройки, кото-

рая подразумевала особую систему взаиморасчетов и которая могла принимать на себя высокие производственные издержки.

Ввиду этого, во-первых, подход к построению маршрута был основан на существующей морской практике, по принципу пространственно-географического деления Арктики на 3 зоны. Границы первой зоны определялись следующим образом: с севера – архипелагами Шпицберген и Земля Франца-Иосифа; с запада – территориальными водами Норвегии; с юга – материковой частью Арктики; с востока – архипелагом Новая Земля и его южным проливом, также известным как Карские ворота; второй зоны: с севера – о. Ушакова; с юга – материковой частью Арктики, включая реки Обь и Енисей с их притоками; с запада – от восточных границ первой зоны; с востока – архипелагом Северная земля; третьей зоны: с севера – группой островов Де-Лонга; с юга – материковой частью Арктики, включая реки Хатанга, Лена, Яна, Индигирка, Колыма с их притоками; с запада – восточной границей второй зоны; с востока – Беринговым проливом [Дегтева, 2019]. (рис. 11.2).

Принцип такого деления обусловлен короткими сроками летне-осенней навигации, когда становится проходимыми Новоземельские проливы и пролив Вилькицкого, так как в зимне-весенний период проходы через эти проливы затруднены по причине высокой ледовитости. Ледовая обстановка затрудняет переход из

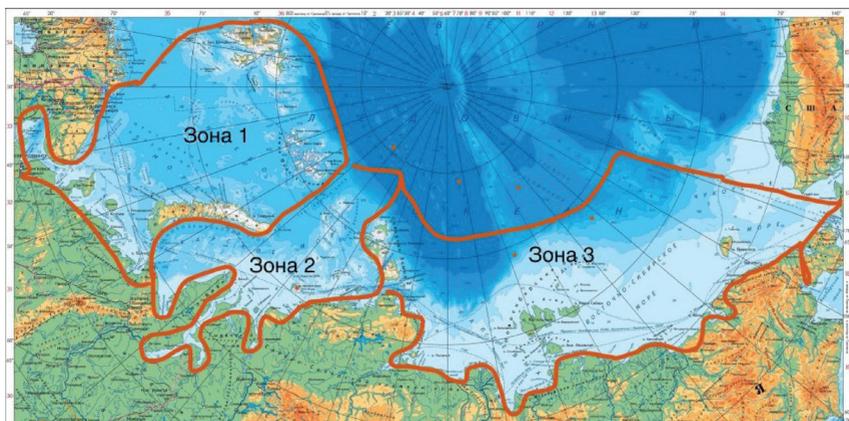


Рис. 11.2. Пространственно-географическое деление Арктики по зонам снабжения

одной зоны и другую, соответственно, и в обратном направлении [Wang, Yuan, Ting, Li, 2016].

Во-вторых, внутри каждой зоны очередность прохождения определена приоритетом островных точек, после прохождения которых, на пути следования выхода из зоны, осуществляется заход в материковые пункты доставки грузов по причинам, указанным ранее.

Таким образом, описанный принцип построения маршрута, с точки зрения сетевого моделирования, в терминологии метода представляется следующим образом: вид связей между зонами внутри них – жесткие; при этом, говоря о средствах доставки, – им присущи ресурсные связи, так как судно и грузовое оборудование на нем не могут параллельно выполнять несколько работ одновременно или находиться в нескольких местах одновременно; мягкие связи – отсутствуют.

В качестве вершин графа выделим некоторые пункты доставки из исследованных групп грузополучателей и дадим им краткую характеристику. Однако автором данной методологии предложено совместить группы научно-исследовательских учреждений с группой военизированных ведомств и группу муниципалитетов субъектов АЗРФ с частными непромышленными предприятиями ввиду инфраструктурной однородности мест доставки грузов, обусловленной, в первом случае, ведомственной близостью органов, а во втором – коммерческим аспектом (таб. 11.2).

Таблица 11.2

**Характеристика пунктов доставки [Андрианов, 2012]**

№	Пункт снабжения	Потребитель
Из группы промышленных предприятий:		
1	арх. Шпицберген, порт Баренцбург	Предприятие ОАО «Арктикуголь», месторождения угля
2	Порт Варандей	ООО «Варандейский терминал», нефтедобывающие компании
3	Портопункт Харасавэй	ООО «Стройгазконсалтинг» Харасавэйские газодобывающие компании, строительство газоналивного терминала
4	Порт Сабетта	ООО «Терминал Сабетта» Южно-Тамбейское газоконденсатное месторождение, газоналивной терминал

Окончание табл. 11.2

№	Пункт снабжения	Потребитель
5	Порт Дудинка	АО «Норильский никель» Месторождение полиметаллических руд Норильск I
6	Порт Новый порт	ПАО «Газпром нефть» Новопортовское нефтяное месторождение, строительство нефтеналивного терминала
Из групп научно-исследовательских учреждений и военизированных ведомств:		
7	Арх. Новая Земля, полярная станция Малые Кармакулы	Министерство Природных Ресурсов Российской Федерации, Министерство Обороны Российской Федерации, Федеральная Служба Безопасности Российской Федерации
8	Арх. Новая Земля, о. Северный, п.г.т. Белушья губа	
9	Арх. Земля Франца- Иосифа (о. Земля Александры)	
10	О. Визе	
11	Порт Диксон	
12	Арх. Северная Земля (о. Большевик)	
13	Арх. Новосибирские острова (о. Котельный)	
14	О. Врангеля	
Из групп муниципалитетов субъектов АЗРФ и частных непромышленных предприятий		
15	Порт Амдерма	Муниципальные образования включенные в Арктическую зону Российской Федерации
11	Порт Диксон	
16	Порт Тикси	
5	Порт Дудинка	
17	Порт Певек	

Таким образом, определив вершины графа, проведем построение графа (рис. 11.3) и трансформируем его в матрицу (табл. 11.3).

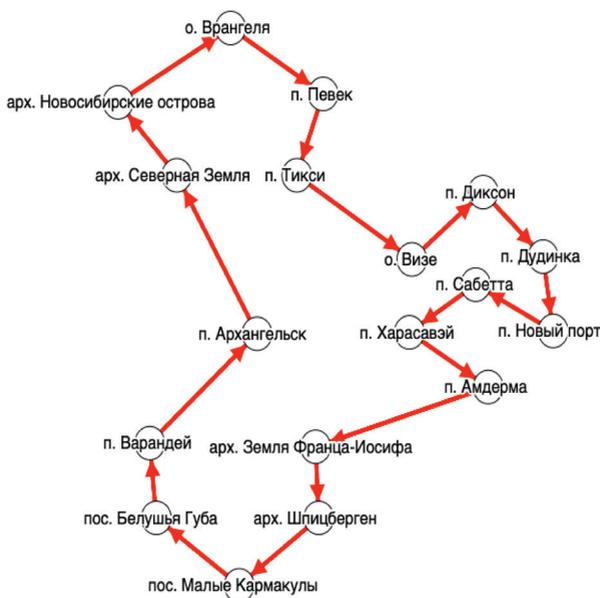


Рис. 11.3. Предполагаемая очередность прохождения маршрута в виде ориентированного графа

Вариативная матрица расстояний, с учетом присущих ей связей, будет выглядеть следующим образом. Значения в ячейках: 0 – пункт отправления (строка) не инцидентен пункту прибытия (столбец); 1 – пункт прибытия предшествует пункту отправления; 1 – пункт отправления предшествует пункту прибытия (табл. 11.3).

Исходя из представленного графа и таблицы инцидентности, расстояние предполагаемого маршрута 19304 км.

Для моделирования производственных процессов в организациях транспорта используются некоторые программные продукты.

Само по себе моделирование может использоваться в разных областях деятельности: от анализа поведения пешеходов на улицах до работы промышленного предприятия и эмуляции сетевых устройств (как Boson NetSim компании Cisco). Некоторые решения узкоспециализированные, а некоторые имеют широкую область применения. Однако в рамках настоящего исследования предлагается акцентировать внимание только на сфере транспорта и логистики.

Таблица 11.3

Матрица инцидентности предполагаемого маршрута

Порты/Пункты	Адр. М. Кар.	Бел. Губа	адр. ЗФИ	о Шпид.	Вар.	Хар. Анд.	о Висе	Саб.	Н. порт.	Джк.	о Больш.	Дуд.	Тик.	о Ког.	Плж.	о Вран.
Архангельск	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Малая Кармакулы	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Белушья губа	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
адр. ЗФИ	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
о Шпидберген	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Варандей	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Харкаевый	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
Амдерма	-1	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
о Висе	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0
Сабетга	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
Ньюый Порт	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0
Диксон	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
о Большелвик	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Дурлама	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0
Тикси	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
о Когелыный	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	1
Певек	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1
о Врангели	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0

AnyLogic – это как раз тот инструмент, который использовали «Деловые линии» для оптимизации цепочек поставки. Этот продукт поддерживает разные методы моделирования (дискретно-событийный, системно динамический и агентный), а также их совместное использование в одной модели. Поэтому использоваться он может для построения самых разных моделей. У AnyLogic есть решения для моделирования работы распределительных центров, промышленных предприятий, маркетинговых компаний и многого другого. Модели можно визуализировать в 3D и 2D.

Tecnomatix Plant Simulation – продукт компании Siemens Industry Software, рассчитанный на применение в области логистики и транспорта. При построении модели используются следующие типы объектов: материалопоток, информационный поток, подвижные объекты, пользовательский интерфейс, ресурсы и инструменты. У всех объектов есть пользовательский интерфейс для настройки их параметров, а следовательно, и свою модель поведения. Доступны визуализации в 2D и 3D-режимах.

AutoMod – система, разработана компанией Brooks Automation (США), она позволяет произвести детальный анализ операций и потоков. Основные области применения: дистрибуция, промышленное производство и логистика. Модели могут визуализироваться в 3D.

PTV Vision Vissim – система для создания имитационных моделей движения транспорта и функционирования дорожных развязок, а также пешеходных потоков в городах. Включает в себя четыре специализированных программных продукта для работы в различных направлениях: VISUM (расчет спроса и себестоимости транспорта), VISSIM (организация дорожного движения), VISWALK (анализ движения пешеходов), VISTRO (регулировка дорожного движения). Система разработана российской компанией «А+С Консалт».

Enterprise Dynamics – программная платформа, созданная нидерландской компанией INCONTROL Simulation Solutions. В Enterprise Dynamics есть программные решения для работы в различных направлениях бизнеса, в их числе: аэропорты, управление людскими потоками (улицы, массовые мероприятия, стадионы), промышленность и логистика. Решение для складской логистики предполагает возможность интеграции с системами WMS. Модели строятся в 3D и 2D.

ISSOP – немецкий программный продукт для оптимизации работы в промышленном производстве и логистике, в котором предусмотрена возможность построения имитационных моделей. Модели доступны в 3D и 2D. Также модели из ISSOP могут быть оптимизированы для использования в других программах для имитационного моделирования, таких как: eM-Plant, Enterprise Dynamics, ARENA, Automod.

Если обобщить все изложенное выше, моделирование позволяет учесть все детали и просчитать возможные сценарии развития событий, которые не рассчитала бы ни одна группа специалистов. Эту технологию нельзя назвать широко известной, но даже в России найдется достаточно успешных кейсов с ее применением, не говоря уже об общемировом опыте.

Стоит отметить, что представленные программные продукты подходят под решение узконаправленных задач с заранее известными условиями, что не позволяет включить в модель динамические показатели, которые присущи ТТС АЗРФ.

Также следует указать некоторые аспекты моделирования ТТС АЗРФ и представить маршрут завоза, построенный на стандартном принципе формирования ТТС АЗРФ.

В первую очередь остановимся на методологических проблемах, ТТС системах Арктической зоны Российской Федерации.

Первая проблема, как сказано ранее, следует из отсутствия единого информационного пространства ввиду недостатка статистических наблюдений [Toyasaki, 2013]. Именно поэтому необходимо введение дополнительных показателей в модель, которые позволят решить широкий спектр экономических задач.

Вторая проблема связана с трудностями экспертного оценивания факторов, влияющих на динамические и вариативные показатели, так как стандартные методы могут привести к неадекватности конечного результата.

Третья проблема – необходимость актуализации текущих моделей ТТС региона.

В качестве концептуальной основы для разработки модели экономической оценки транспортно-технологических систем представляются группы проблем, описанные выше. Таким образом, в систему включены: модели транспортных потоков на сетях [Blokus-Roszkowska, Smolarek, 2014], производственных и техно-

логических средств, регулирования и управления. Связующей основой системы является рациональная последовательность прохождения маршрута рейса, которая регулируется показателями экономической оценки, описанными выше.

В классическом сетевом представлении модели транспортных процессов задача может быть сформулирована следующим образом [Иванов, Токарев, Уздемир, 1994]. Выбранный регион содержит пункты распределения и потребления различных видов продукции и транспортные узлы для водного транспорта, однако при этом каждый пункт распределения и потребления является транспортным узлом. Пункты соединяются морскими коммуникациями, каждая из которых представлена в виде ориентированной дуги соответствующего графа.

Таким образом, специфика экономической оценки транспортно-технологических систем в Арктической зоне Российской Федерации с точки зрения моделирования ТТС, описанная автором ранее, подразумевает под собой комплексный подход к экономической оценке.

Рассмотрим, что необходимо для построения модели оценки и что требуется включить в модель.

Равным образом необходимо учитывать следующие факторы: текущую конъюнктуру морских коммуникаций; перспективные направления развития перевозок; транспортную инфраструктуру региона и отдельно взятых пунктов; разновидность и продолжительность погрузо-разгрузочных операций в пунктах назначения; напрямую коррелирующее с глубинами акваторий, метеоусловиями и ледовой обстановкой; ледокольное сопровождение перевозок и/или наличие судов соответствующего ледового класса для данного региона; направление в геополитике. Учесть их в задачах экономической оценки достаточно сложно, поскольку они в различных ситуациях проявляются различно.

Акватория АЗРФ является самой большой по площади среди прочих российских бассейнов. В связи с этим доставка груза в регионе имеет обширный пространственно-географический характер, что представляет дополнительные сложности для транспортных организаций.

Главная проблема, с которой они сталкиваются, – формирование экономически выгодного грузопотока, который сможет обе-

спечить своевременную и качественную доставку груза в пункт назначения [Куратова, 2017].

Морская практика показала, что в качестве инструмента для повышения доходности рейса судна принято брать попутные грузы. Однако может происходить и другая ситуация – пунктов доставки несколько и встает вопрос об очередности их прохождения при составлении маршрута.

Предложенная методика позволяет сформировать ТТС, которая будет удовлетворять обеим ситуациям в транспортных предприятиях различного уровня, будь то логистический оператор, логистический посредник, экспедитор или судоходная компания. Ниже представлена схема экономической оценки ТТС доставки грузов АЗРФ, соответствующая рис. 11.3.

Рассмотрим подробнее каждый этап. На первом этапе реализации методики проводится построение маршрута предполагаемого рейса, принимаемого за базовый.

Примем во внимание, что базовый маршрут должен быть построен на основе сложившейся морской практики доставки грузов в Арктической зоне Российской Федерации. Маршрут строится в виде ориентированного графа (рис. 11.3), который переводится в инвариантную матрицу инцидентности (табл. 11.3), согласно методам сетевого моделирования [Царьков, 2019].

На втором этапе выполняется переход от инвариантной матрицы инцидентности к вариативной. На первом подэтапе проводится расстановка мягких связей между всеми пунктами доставки.

На втором подэтапе проводится процедура экспертного опроса, целью которого является снижение количества заведомо ложных мягких связей. Экспертам формулируются следующие условия и задачи:

- 1) создать маршрут доставки грузов с возвратом в первоначальный пункт отправления путем введения дополнительных мягких связей между пунктами доставки, при этом исключить жесткие;
- 2) избегать условий повышенной ледовитости на маршруте;
- 3) приоритетными считать пункты, расположенные за проливом Вилькицкого, в том числе арх. Северная Земля, однако подразумевать возможность захода в пункты по пути следования.

На основе результатов экспертного опроса дополняется составленная ранее матрица инцидентности, как представлено в табл. 11.4.

Таблица 11.4

**Матрица инцидентности маршрута**

Пункт доставки	1	2	3	4
1	0	-1/1	-1/1	-1/1
2	-1/1	0	-1/1	-1/1
3	-1/1	-1/1	0	-1/1
4	-1/1	-1/1	-1/1	0

На третьем этапе необходимо составить технологическую схему рейса. Для этого необходимо сопоставить параметрические характеристики принятых к доставке грузов и их количество с параметрическими характеристиками трюмов судов флота. Данный этап представляет наибольший интерес для транспортных организаций, которые будут заниматься перевозкой груза [Шлык, Балашова, 2017]. Таким образом, по результатам этапа составляется технологическая схема рейса судна (табл. 11.5).

Таблица 11.5

**Технологическая схема рейса**

Пункт доставки	Параметрические характеристики груза	
	Весовые, т	Объемные, м <sup>3</sup>
1	х	у
2	х	у
3	х	у
4	х	у
5	х	у

На четвертом этапе необходимо определить связи между показателями или группами показателей формируемой ТТС – то есть, определить, какой показатель считать ключевым. Для определения приоритетов применяется метод экспертных оценок, шкала оценок которых варьируется от 0 до 9, где 0 – связь отсутствует, а 9 – самая сильная [Коробов, 2019].

Стоит отметить, что, в связи с исследованными особенностями данного региона, природные и технические показатели будут оказывать параллельное влияние на экономико-технологические.

По результатам экспертного опроса составляется сводная таблица оценок, в которой определен уровень влияния на экономико-технологические факторы (табл. 11.6).

Таблица 11.6

## Шаблон таблицы результатов экспертных оценок

Экономико-технологические показатели	Природные				Технические					
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
Себестоимость доставки 1 УГЕ	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Себестоимость рейса	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Затраты в пункте доставки	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Себестоимость грузовой операции	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Себестоимость суток фрахта	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Затраты на портовые сборы	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Затраты на прохождение участка маршрута	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Затраты на ледовую проводку	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Выделяется приоритетный показатель, на основании которого будет определяться экономический эффект от экономической оценки ТТС. Как правило, основным экономическим показателем являются затраты на единицу УГЕ или тонны груза.

На пятом этапе определяется вес ребер графа и его вершин, где вершина – временные затраты в пункте доставки, а ребро – временные затраты прохождения участка между пунктами доставки (вершинами).

Расчет временных затрат в вершине производится по формуле:

$$T_{cn} = V_c \cdot T_{co} \quad (11.6)$$

где  $V_c$  – количество груза в тоннах или УГЕ в штуках,  $T_{co}$  – временные затраты на разгрузку 1 тонны или УГЕ.

Расчет временных затрат на участке производится по формуле:

$$T_{n(0-1)} = \frac{W_p}{S_s} \cdot k_i \quad (11.7)$$

где  $W_p$  – расстояние участка в км,  $S_s$  – нормативная скорость судна;  $k_i$  – коэффициент ледовых условий, который равен: 1 – отсутствие ледовитости, 1,5 – повышенная ледовитость, 2 – ледовитость, которую судно не способно преодолеть самостоятельно.

Таким образом, на основании вычисленных временных затрат в пунктах доставки и на участках маршрута составляется матрица временных затрат (табл. 11.7).

Таблица 11.7

**Матрица временных затрат в пунктах доставки**

Пункт доставки	1	2	3	4
1	0	$T_{c1} + T_{(1-2)}$	$T_{c1} + T_{(1-3)}$	$T_{c1} + T_{(1-4)}$
2	$T_{c2} + T_{(2-1)}$	0	$T_{c2} + T_{(2-3)}$	$T_{c2} + T_{(2-4)}$
3	$T_{c3} + T_{(3-1)}$	$T_{c3} + T_{(3-2)}$	0	$T_{c3} + T_{(3-4)}$
4	$T_{c4} + T_{(4-1)}$	$T_{c4} + T_{(4-2)}$	$T_{c1} + T_{(4-3)}$	0

На шестом этапе к полученной матрице временных затрат применяется метод комбинаторной оптимизации – задача коммивояжера, основанная на формуле (11.1).

Таким образом, в результате расчетов определяется очередность прохождения пунктов доставки.

На седьмом этапе производится расчет неизменных затрат в обоих рейсах, включающий в себя портовые сборы и затраты на ледокольную проводку, по формуле:

$$C_k = C_{ix} + C_i \quad (11.8)$$

На восьмом этапе определяется экономический эффект маршрута, предложенного в сравнении с базовым. Затраты на рейс рассчитываются по формуле (11.3), стоимость доставки единицы УГЕ в рейсе по формуле (11.2).

Эффективность, определяется отношением стоимости базового рейса к предложенному, при этом предложенный должен превосходить базовый не менее, чем на 10%:

$$\frac{C_{IUL1}}{C_{IUL2}} \cdot 100 \geq 10 \quad (11.9)$$

Таким образом, предложенный метод экономической оценки ТТС АЗРФ позволяет повысить экономическую эффективность системы, не изменяя технологии доставки грузов. Целесообразно проводить экономическую оценку перед каждым рейсом, что позволит снизить затратную часть рейса.

Построим модель экономической оценки транспортно-технологической системы доставки грузов в Арктической зоне Российской Федерации. В основе любой экономической оценки лежит модель и методология оценки, по которым определяются условия, рамки и ограничения её применения. Соответственно, для выбора вида модели и методологии экономической оценки необходимо определить набор показателей и охарактеризовать их. При этом необходимо учесть региональный аспект географии исследования, так как Арктическая зона Российской Федерации имеет ряд природных факторов, повышающих издержки рейса.

В качестве базовой транспортно-технологической системы рассмотрим наиболее приближенные к актуальным потребностям материально-технического снабжения региона особенности, а именно: поставка генерирующего оборудования с возобновляемыми источниками энергии для обеспечения электроэнергией прилегающие к пунктам инфраструктуру с жизненно важной продукцией, такой как: продукты питания, спецодежда, лекарства, средства связи, запасные части оборудования и прочее, а также смена персонала [Безруков, 2017].

Как описано выше, Северный завоз долгое время связывал линией снабжения все прибрежные, островные и материковые населенные пункты с ограниченной транспортной доступностью. В связи с этим предлагается частично использовать опыт снабжения Крайнего севера, как основополагающий для дальнейшего исследования. При этом до недавнего времени порты Архангельск и Мурманск служили базовыми точками отправления Северного завоза. Однако в современной практике наиболее привлекательным принято считать Архангельск по следующим причинам:

1) более короткое автодорожное (по федеральным трассам) и железнодорожное плечо от ближайших логистических центров городов Москва и Санкт-Петербург, чем у порта Мурманск (табл. 11.8);

2) строящаяся железнодорожная ветка Белкомур, окончательностью которой будет глубоководный портовый район города Архангельска, находящийся на южном побережье Белого моря;

3) общемировая концепция увеличения объемов импортного и транзитного грузооборота стран Азии свидетельствует о новом витке развития направления Восток-Запад на евразийском континенте, как следствие развития транспортной инфраструктуры;

Таблица 11.8

**Расстояние автомобильных и железнодорожных магистралей до портов Архангельск и Мурманск из логистических центров городов Москва и Санкт-Петербург [Бразовская, 2018]**

Город отправления	Архангельск		Мурманск	
	Длина а/д дороги, км	Длина ж/д дороги, км	Длина а/д дороги, км	Длина ж/д дороги, км
Москва	1200	1147	1900	1933
Санкт-Петербург	1200	1222	1300	1417

4) исторически сложившийся аспект морской практики Северного завода;

5) стоимость бункеровки судна в порту Архангельск ниже, чем в порту Мурманск, в среднем на 1500 рублей за тонну судового топлива (по данным агентства Arcis [Arcis: сайт. – Москва, 2019]).

Среди недостатков порта Архангельск, в сравнении с портом Мурманск, можно выделить:

- 1) дороговизна портовых сборов (табл. 11.9);
- 2) замерзающая акватория порта.

Таблица 11.9

**Сравнительная характеристика ставок сборов портов Архангельск и Мурманск [Дженюк, 2014]**

Вид сбора	Ставка, руб./1 регистровую тонну (все суда, кроме накатных, наплавных, контейнеровозов и наливных)	
	Архангельск	Мурманск
Корабельный	5,19	7,26
Канальный	7,52	–
Лоцманский		
За милю	5,75	0,11
За операцию	4,3	0,54
Маячный сбор	0,57	1,16
Навигационный	1,02	6,55
СУДС	0,5	0,9
Ледокольный сбор	8,72	–
СТБАМП	1	1
Итого ставка	34,57	17,52

Для дальнейшего построения маршрута и расчета экономической оценки, а также для определения возможных издержек рейса необходимо определить расстояния между пунктами снабжения. Расчет расстояний производится натуральным способом, исходя из морской практики, лоций и фарватеров акваторий. Единица исчисления – километры.

Краеугольным камнем каждой транспортно-технологической системы является УГЕ. В общемировой практике с этой проблемой столкнулись во второй половине XX века в тот момент, когда уровень технического и технологического развития инструментов доставки (судов) опережал грузовые и затарочные [Елисеев, Наумова, 2019]. Именно поэтому был введен международный стандарт (ISO), регламентирующий параметрические данные перевозимой тары – контейнеры, иначе говоря, УГЕ. Контейнеры, являясь универсальным многооборотным предметом затарки, представляются наиболее удобным для транспортировки большинства номенклатурных групп, за исключением наливных и навалочных. Стоит отдельно сказать о том, что в настоящее время существуют специализированные контейнеры, преимущественно 20-футовые, в редких случаях 40-футовые, для перевозки последних номенклатурных групп [Воробьев, 2013].

В разрезе Арктической зоны Российской Федерации основным типом контейнеров, используемых в транспортно-технологических системах Арктической зоны Российской Федерации, является трехтонный контейнер. В связи с этим его грузовые характеристики будут использованы в качестве УГЕ (табл. 11.10).

Другой особенностью транспортно-технологических систем доставки грузов в Арктической зоне Российской Федерации является широкая вариативность видов разгрузочных операций. Как сказано ранее, классификация погрузочных операций включает: стандартную разгрузку у причала; распаузу или выгрузку на рейде; транспортировку волоком; выгрузку на ледовый причал; вертолетную разгрузку.

Судно, отметим ещё раз, в первую очередь, должно соответствовать ледовому классу, который позволит находиться в акваториях пунктов назначения. Второй критерий – достаточный объем трюмов для транспортировки заявленной номенклатуры грузов.

Третий критерий связан с инфраструктурными условиями разгрузок, поэтому у судна должны быть все необходимые средства для вариативности грузовых операций. Четвертый критерий – осадка судна должна соответствовать глубинам акваторий пунктов снабжения.

Таблица 11.10

**Грузовые характеристики трехтонного контейнера  
[Жариков, 2016]**

Размеры, габариты	Внешние	Внутренние
Длина, м	2,1	1,93
Ширина, м	1,325	1,225
Высота, м	2,4	2,09
Размеры дверного проема		
Ширина, м		1,95
Высота, м		2,1
Весовые параметры		
Вес контейнера, т		0,6
Грузоподъемность, т		2,4
Максимальная масса, т		3
Объем контейнера, метров кубических		4,9

Наиболее пригодным для эксплуатации в условиях морей Арктической зоны Российской Федерации является судно «Пионер» как наиболее соответствующее указанным критериям (рис. 11.4).



Рис. 11.4. Судно «Пионер»

В таблице представлены основные эксплуатационные характеристики судна, соответствующие заявленным требованиям (табл. 11.11).

Таблица 11.11

## Технические характеристики судна «Пионер»

Тип и значение	Универсальный сухогруз
Класс судна	AUT2, генеральный груз КМ*L1 (Arc4)
Дедвейт, т	5820
Длина, м	102,83
Ширина, м	15,85
Максимальная осадка, м	6,54
Высота борта, м	8,1
Трюма	
№ 1 суженный к носовой части, м	31,80×12,85×8,11
№ 2 суженный к кормовой части, м	31,80×12,85×8,11
Общий объем, м. куб.	6904
Судовые краны, т	2*36/70
Средняя скорость, км/ч	20,4

Следующим показателем являются портовые сборы. Тариф каботажного плавания в портах Арктической зоны Российской Федерации производится из расчета рубль за одну брутто-регистрационную тонну и представляет следующие сборы:

1) корабельный сбор на все суда, кроме накатных, наплавных, контейнеровозов и наливных за одну брутто-регистрационную тонну, на накатные, наплавные суда и контейнеровозы за одну брутто-регистрационную тонну, на наливные суда – за одну брутто-регистрационную тонну;

2) каналный сбор на все суда, кроме накатных, наплавных, контейнеровозов и наливных – за одну брутто-регистрационную тонну, на накатные, наплавные суда и контейнеровозы – рублей за одну брутто-регистрационную тонну, на наливные суда – за одну брутто-регистрационную тонну;

- 3) лоцманский сбор начисляется по двум критериям:
  - за операцию на все суда, кроме накатных, наплавных, контейнеровозов и наливных – за одну брутто-регистрационную тонну, на накатные, наплавные суда и контейнеровозы – за одну брутто-регистрационную тонну, на наливные суда – за одну брутто-регистрационную тонну;
  - за каждую милю на все суда, кроме накатных, наплавных, контейнеровозов и наливных – за одну брутто-регистрационную тонну, на накатные, наплавные суда и контейнеровозы – за одну брутто-регистрационную тонну, на наливные – за одну брутто-регистрационную тонну;
- 4) маячный сбор на все суда, кроме накатных, наплавных, контейнеровозов и наливных – за одну брутто-регистрационную тонну, на накатные, наплавные суда и контейнеровозы – за одну брутто-регистрационную тонну, на наливные – за одну брутто-регистрационную тонну;
- 5) навигационный сбор на все суда, кроме накатных, наплавных, контейнеровозов и наливных – за одну брутто-регистрационную тонну, на накатные, наплавные суда и контейнеровозы – за одну брутто-регистрационную тонну, на наливные – за одну брутто-регистрационную тонну;
- б) за использование систем управления движения судов на все суда, кроме накатных, наплавных, контейнеровозов и наливных – за одну брутто-регистрационную тонну, на накатные, наплавные суда и контейнеровозы – одну брутто-регистрационную тонну, на наливные – рублей за одну брутто-регистрационную тонну;
- 7) летняя ставка на ледакольный сбор, с 11 мая по 09 ноября, на все суда, кроме накатных, наплавных, контейнеровозов и наливных – за одну брутто-регистрационную тонну, на накатные, наплавные суда и контейнеровозы – за одну брутто-регистрационную тонну, на наливные – за одну брутто-регистрационную тонну;
- 8) зимняя ставка на ледакольный, с 10 ноября по 10 мая, на все суда, кроме накатных, наплавных, контейнеровозов и наливных – за одну брутто-регистрационную тонну, на накатные, наплавные суда и контейнеровозы – за одну брутто-регистрационную тонну, на наливные – за одну брутто-регистрационную тонну;
- 9) сбор транспортной безопасности акватории морского порта на все суда, кроме накатных, наплавных, контейнеровозов и наливных – за одну брутто-регистрационную тонну, на накатные, наплав-

ные суда и контейнеровозы – за одну брутто-регистрационную тонну, на наливные – за одну брутто-регистрационную тонну.

Ледокольный сбор взимается за прохождение судна по каналу при заходе, выходе или проходе транзитом морских портов Арктической зоны Российской Федерации. На судна, работающие на линиях (за исключением пассажирских), применяется коэффициент 0,8. Ставки ледокольного сбора не применяются для судов, следующих в морской порт «Архангельск» с внутренних водных путей и обратно, а также пассажирских судов [Матишов и др., 2013].

Для судов не имеющих ледового класса Arc5 и выше, в период ледокольных проводок применяется коэффициент 1,3. Для судов валовой вместимостью 3000 и более применяется коэффициент 0,87.

Лоцманский сбор уплачивается за каждую самостоятельную операцию, включая постановку на якорь, снятие с якоря, швартовку к причалу, отшвартовку от причала, ввод и вывод судна из дока. На судна, работающие на линиях (за исключением пассажирских), применяется коэффициент 0,8. При перетяжке судна вдоль причала лоцманами на борту применяется коэффициент 0,5 за операцию [Шумаев и др., 2016]. По результатам расчета портовых сборов их сумма составила 519110,06 рублей.

На основании составленной информационной базы модели проведем расчет эффективности заявленных условий рейса судна с помощью ранее предложенной методики.

На первом этапе в качестве базового примем маршрут, описанный во второй главе, представленный в виде ориентированного графа (рис. 11.3) и инвариантной матрицы инцидентности (табл. 11.3).

На втором этапе проведем расстановку мягких связей между пунктами доставки грузов, а также экспертную оценку связей для снижения заведомо ложных мягких связей.

На третьем этапе составим технологическую схему рейса, исходя из грузовых потребностей пунктов доставки грузов, и определим вид грузовой операции, исходя из портовой инфраструктуры (табл. 11.12).

На четвертом этапе в результате экспертной оценки показателей (табл. 11.13) определен ключевой показатель – себестоимость доставки единицы УГЕ.



Окончание табл. 11.13

Экономико-технологические показатели	Природные				Технические					
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
Затраты на портовые сборы	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Затраты на прохождение участка маршрута	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Затраты на ледовую проводку	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

На пятом этапе на основе методики произведен расчет временных затрат в пунктах доставки.

На шестом этапе, используя метод комбинаторной оптимизации, определяем следующую очередность прохождения маршрута, представленную в виде графа (рис. 11.5).

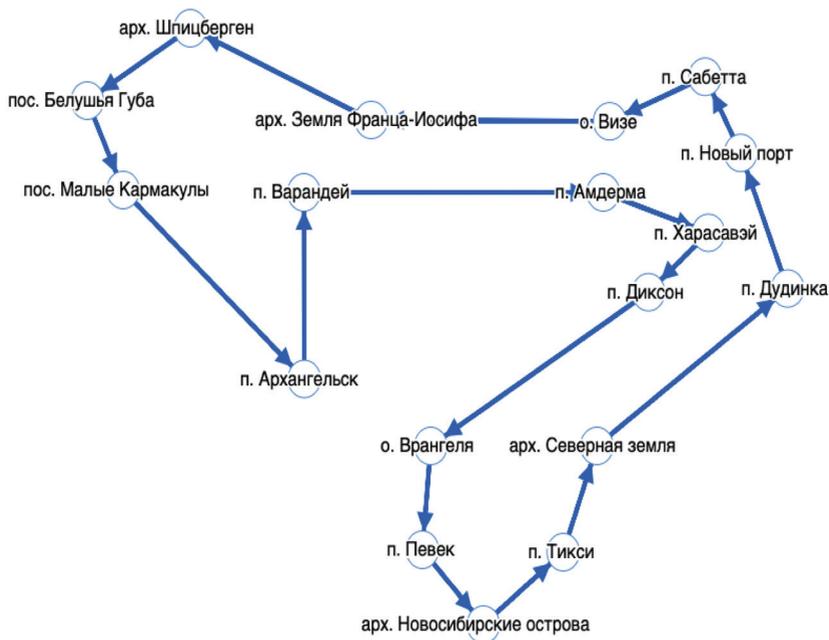


Рис. 11.5. Предложенная очередность прохождения маршрута в виде ориентированного графа

В географических координатах различия в базовом и оптимизированном маршрутах представлены на рис. 11.6. и 11.7.

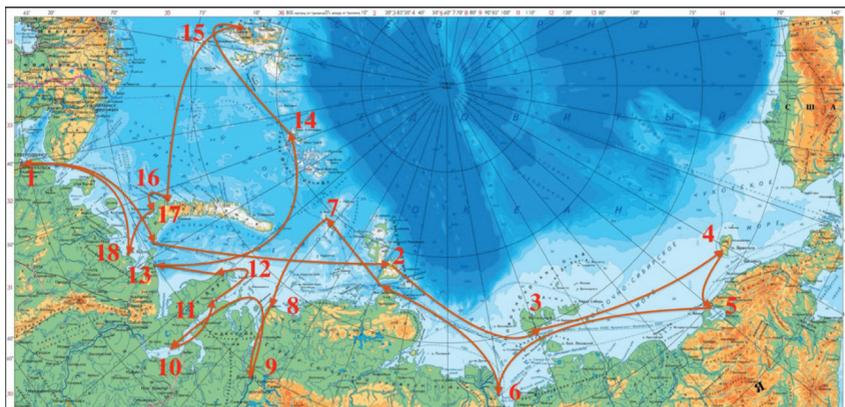


Рис. 11.6. Базовый маршрут

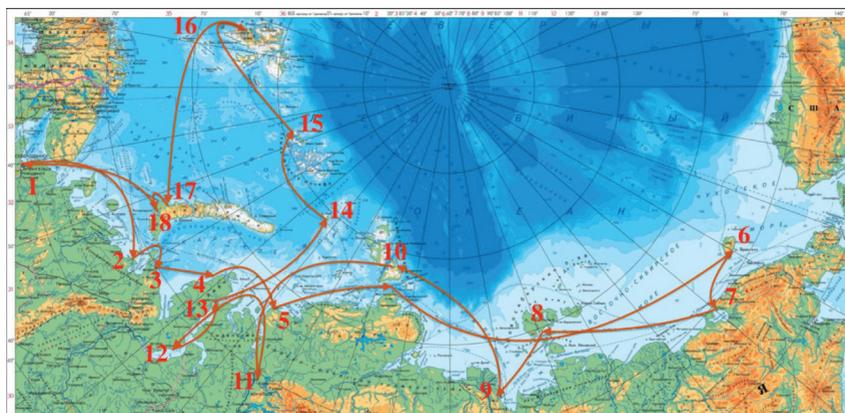


Рис. 11.6. Предложенный маршрут

На седьмом этапе произведен расчет как базовой, так и предложенной себестоимости затрат на рейс судна и себестоимость затрат на единицу УГЕ ТТС.

$$C_{11} = \sum_{n=18} C_n + \sum_{n=18} C_{n(0-1)} = 19\,500\,000 + 20\,300\,000 = 39\,800\,000 (\text{руб.})$$

$$C_{IUL1} = \frac{C_{t1}}{V_{IUL}} = \frac{39800000}{376} = 105851,06 (\text{руб.})$$

$$C_{t1} = \sum_{n=18} C_n + \sum_{n=18} C_{n(0-1)} = 19500000 + 15360000 = 34860000 (\text{руб.})$$

$$C_{IUL1} = \frac{C_{t2}}{V_{IUL}} = \frac{34860000}{376} = 92712,77 (\text{руб.})$$

На восьмом этапе определяется экономический эффект от моделирования рейса:

$$\Delta C_t = 4940000 (\text{руб.})$$

$$\Delta C_{IUL} = 13138,29 (\text{руб.}) = 14,17\%$$

Экономический эффект оценки ТТС АЗРФ составил 4940000 (руб.) в структуре затрат на рейс, и удалось снизить себестоимость доставки единицы УГЕ на 14,17%, что выше, чем средний показатель рентабельности по отрасли предприятий транспорта в 2018 г. – 11%.

Таким образом, приведенная экономическая оценка ТТС АЗРФ позволяет сделать вывод об эффективности предложенной методики для организаций транспорта различного уровня, так как при масштабировании и параллельном применении на нескольких рейсах судов экономический эффект будет суммироваться.

## Глава 12

### **Возможности оптимизации погрузочно-разгрузочных операций**

Рассмотрим несколько частных случаев применения математических моделей для одной из наиболее актуальных проблем – выгрузки на берег с судна при помощи различных транспортных средств с учетом возможных обобщений на более широкий класс задач по организации управления перевозками по Севморпути [Есеев, Коробов, Макаров, Матвеев, Тутыгин, 2017].

*Постановка задачи.* Рассмотрим задачу о нахождении географического места для максимально выгодной перевозки груза судном и вертолетом до необходимых пунктов выгрузки. В этой задаче есть два фактора, которые необходимо принять во внимание. Первый фактор – это стоимость или время, затраченное при перевозке груза вертолетом из точки останова судна. Второй фактор – это стоимость или время, затраченное при перевозке из точки отправления судна до точки его разгрузки вертолетом.

Сначала рассмотрим первый вышеприведённый фактор, то есть разгрузку груза вертолетом. Эта задача связана с транспортной задачей [Гольштейн, 1969; Канторович, 1942; Ambrosio, Kirchheim, Pratelli, 2004; Ambrosio, 2000; Beckmann, 1952], где один пункт производства – это судно с грузом, а  $n$  пунктов потребления – это географически закреплённые места. При этом методы и подходы классической транспортной задачи развиваются как в направлении общей теории, так и приложений [Гасников и др., 2013; Benamou, Brenier, 1999; Benamou, Brenier, 2000; Carlier, Ekeland, 2007; Davila, Kim, 2016].

Покажем, что, используя непосредственно транспортную задачу в нашем случае, мы не получим требуемого результата, поскольку решить такую задачу будет очень сложно. Именно поэтому нами будет предложен другой подход, но близко связанный с транспортной задачей. Классическая транспортная задача ставится следующим образом: имеется некоторых  $m$  пунктов отправления (производства)  $A_1, A_2, \dots, A_m$ . В этих пунктах находятся некоторые грузы (товары) соответственно в количестве  $a_1, a_2, \dots, a_m$  единиц. Также имеется  $n$  пунктов назначения (потребления)  $B_1, B_2, \dots, B_n$ , в которые необходимо доставить  $b_1, b_2, \dots, b_n$  единиц груза. Нам известны стоимости  $C_{ij}$  перевозки единицы груза от каждого заданного пункта отправления  $A_i$  до каждого заданного пункта назначения  $B_j$ . Все числа  $C_{ij}$  считаются заданными и образуют прямоугольную таблицу. Требуется составить некоторый план перевозок, а именно, откуда, куда и сколько единиц поставить, чтобы все пункты доставки грузов получили груз в необходимом объёме, а суммарная стоимость всех перевозок была минимальна. Транспортная задача может быть как открытой, так и закрытой. Задача закрытого типа предполагает выполнение балансового равенства: сумма всех полученных грузов равна сумме

всех отправленных. В открытой транспортной задаче балансовое условие, вообще говоря, не выполняется.

Наиболее известный способ решения транспортной задачи – это метод потенциалов, предложенный Л.В. Канторовичем [Канторович, 1942]. Следует добавить, что именно этим методом обычно решается большинство транспортных задач. Рассмотрим этот метод и покажем, что для нашей задачи он будет чрезвычайно сложен для использования. Именно поэтому необходимо будет изменить этот метод для решения поставленной нами задачи.

Для того чтобы некоторый план  $X = \{x_{i,j}\}_{m,n}$  рассматриваемой транспортной задачи был оптимальным, необходимо и достаточно, чтобы ему соответствовала некоторая система из  $m + n$  чисел  $U_1, U_2, \dots, U_m; V_1, V_2, \dots, V_n$ , которые удовлетворяют условиям  $V_j - U_i \leq C_{ij}$  ( $i = 1 \dots m; j = 1 \dots n$ ). Кроме того, для всех  $X_{ij} > 0$  имело бы место равенство  $V_j - U_i = C_{ij}$ . Рассматриваемые числа  $U_i, V_j$  называются потенциалами пунктов отправления, а условия  $V_j - U_i \leq C_{ij}$  и  $V_j - U_i = C_{ij}$  обычно называют условием потенциальности системы.

Известно, что для того чтобы план транспортной задачи был оптимальным, необходимо и достаточно, чтобы он был потенциальным. Алгоритм расчета в методе потенциалов состоит из предварительного и повторяющегося общего шага. Для получения предварительного плана необходимо провести следующие операции:

1. составление первоначального ациклического плана перевозок,
2. построение для полученного плана системы  $m + n$  чисел  $U_1, U_2, \dots, U_m; V_1, V_2, \dots, V_n$ , таких, чтобы выполнялись условия  $V_j - U_i = C_{ij}$  для всех базисных клеток;
3. после чего необходимо проверить построенную систему на потенциальность. Если система не потенциальна, т.е. план  $X$  не является оптимальным, переходим к общему шагу.

Общий шаг нужно повторять до тех пор, пока система не будет потенциальной. Этот шаг состоит из следующих операций:

- 1) необходимо улучшить план, т.е. заменить план  $X$  новым планом  $X'$  со стоимостью перевозок, не превышающей стоимость плана  $X$ ;
- 2) необходимо построить для  $X'$  новую систему потенциалов  $U'_i, V'_j$  путем перестроения старой;
- 3) проверить систему  $U'_i, V'_j$  на потенциальность.

В итоге предложенный алгоритм сходится за конечное число шагов. Конечно, если пунктов отправления и доставки достаточно много, то такой алгоритм необходимо реализовывать численно, методами линейного программирования [Раскин, Кириченко, 1982].

Кроме того, транспортная задача может быть с неправильным балансом. В вышеотмеченных случаях рассматривалась только такая задача, где сумма товаров равна сумме заявок на товары:  $\sum a_i = \sum b_j$  (где  $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$ ).

Такая постановка задачи является классической транспортной задачей, иначе называемой транспортной задачей с правильным балансом. Встречаются другие варианты транспортной задачи, где это условие нарушено. В таких случаях говорят о транспортной задаче с неправильным балансом.

Балансировку транспортной задачи можно нарушить двумя способами:

1. Сумма товаров в пунктах отправления превышает сумму товаров необходимых в пунктах назначения

$$\sum a_i > \sum b_j \text{ (где } i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n\text{).}$$

2. Сумма товаров необходимых для перевозки в пункты назначения превышает количество товаров в пунктах отправления

$$\sum a_i < \sum b_j \text{ (где } i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n\text{).}$$

Рассмотрим последовательно эти два случая:

#### Транспортная задача с неправильным балансом 1.

В некоторых пунктах  $A_1, A_2, \dots, A_m$  имеются запасы груза  $a_1, a_2, \dots, a_m$ , пункты доставки  $B_1, B_2, \dots, B_n$  подали заявки на товары  $b_1, b_2, \dots, b_n$ , причём так, что

$$\sum a_i > \sum b_j \text{ (где } i = 1, m; j = 1, n\text{).}$$

Требуется найти план перевозок, при котором все заявки будут выполнены, а суммарная стоимость перевозок минимальна. При такой постановке задачи некоторые условия транспортной задачи переходят в условия-неравенства, а некоторые – остаются равенствами.

$$\sum_{j=1}^n X_{i,j} \leq a_i \text{ (} i = 1 \dots, m\text{).}$$

$$\sum_{j=1}^n X_{i,j} = b_i \text{ (} j = 1 \dots, n\text{).}$$

Несмотря на это, можно решать задачу линейного программирования, в какой бы форме (равенств или неравенств) ни были заданы её условия. Такая задача может быть решена, например, обычным и хорошо известным симплекс-методом. Несмотря на это, задачу можно решить проще, если некоторым приемом свести её к ранее рассмотренной транспортной задаче с правильным балансом. Для этого нужно сверх имеющихся  $n$  пунктов назначения  $B_1, B_2, \dots, B_n$  ввести ещё один, несуществующий (фиктивный) пункт доставки  $B_{n+1}$ , которому припишем фиктивную заявку, равную избытку запасов над заявками

$$B_{n+1} = \sum a_i - \sum b_j, \text{ (где } i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n),$$

а стоимость доставки из всех пунктов отправления в этот фиктивный пункт назначения  $b_{n+1}$  можно считать равным нулю. Введением такого фиктивного пункта назначения  $B_{n+1}$  с его заявкой  $b_{n+1}$  мы сравняли баланс транспортной задачи и теперь его можно решать как обычную транспортную задачу с правильным балансом.

### Транспортная задача с неправильным балансом 2.

Эту задачу можно свести к обычной транспортной задаче с правильным балансом, если включить в схему перевозок фиктивный пункт отправления  $A_{m+1}$  с запасом  $a_{m+1}$ , равным недостающему запасу, и стоимость перевозок из фиктивного пункта отправления во все пункты назначения принять равной нулю.

Решение транспортной задачи начинается с нахождения опорного плана. Для этого существуют большое разнообразие способов: «северо-западного угла», «минимальной стоимости по столбцу», «минимальной стоимости по строке» и «минимальной стоимости таблицы». Например, в способе «северо-западного угла» заполняется таблица перевозками постепенно, начиная с левой верхней ячейки («северо-западного» угла таблицы). Другой способ – это способ минимальной стоимости по строке, который основан на том, что мы распределяем продукцию от пункта  $A_i$  не в произвольный пункт  $B_j$ , а в тот, у которого стоимость перевозки минимальна. Если в таком пункте заявка полностью удовлетворена, то мы убираем его из наших расчетов, после чего находим минимальную стоимость перевозки из оставшихся пунктов  $B_j$ . Во всем остальном этот метод похож на метод «северо-западного угла». Способ «минимальной стоимости по столбцу» аналогичен

чен предыдущему способу. Его отличие состоит в том, что в этом способе мы распределяем продукцию от пунктов  $B_i$  к пунктам  $A_j$  по минимальной стоимости  $C_{j,i}$ . Опорный план, составленный способами минимальных стоимостей, обычно более близок к оптимальному решению. Клетки таблицы, в которых стоят ненулевые перевозки, являются базисными. Их число должно равняться  $m + n - 1$ . Необходимо отметить также, что встречаются такие ситуации, когда количество базисных клеток меньше, чем  $m + n - 1$ . В этом случае распределительная задача называется вырожденной. И следует в одной из свободных клеток поставить количество перевозок, равное нулю.

Составляя план по «способам минимальных стоимостей», в отличие от плана по способу «северо-западного угла», мы учитываем стоимости перевозок  $C_{i,j}$ , но все же не можем утверждать, что составленный нами план является оптимальным. Более подробно данный вопрос рассмотрен в классической работе по линейному программированию в задачах транспортного типа [Гольштейн, Юдин, 1969].

Помимо метода потенциалов, используют также другие математические методы поиска необходимого решения. Один из них – метод теории графов. Рассматривается граф (точнее, двудольный граф), в котором пункты производства товаров находятся в верхней части графа, а пункты потребления – в нижней части. Пункты производства и потребления попарно соединяются рёбрами бесконечной пропускной способности, а также цены за единицу потока  $C_{i,j}$ . К верхней доле графа присоединяется так называемый «исток». Пропускные способности рёбер из «истока» в пункты производства равны запасу товаров в этом пункте. Цена за единицу потока у этих рёбер равна нулю. Аналогично к нижней доле графа присоединяется «сток». Пропускная способность рёбер из каждого пункта потребления в сток равна потребности в продукте в этом пункте. Цена за единицу потока у этих рёбер тоже равна нулю. После чего решается задача поиска максимального потока минимальной стоимости. Этот алгоритм можно запускать сразу, т.е. без нахождения опорного плана. Но в этом случае процесс решения будет более долгим. При поиске решения для несбалансированной транспортной задачи применяют приём, позволяющий сделать её сбалансированной. Для этого вводят фиктивные пун-

кты назначения или отправления, аналогично рассмотренному выше случаю.

В настоящее время существуют программы, позволяющие решать транспортные задачи с небольшим количеством пунктов отправления и назначения. При увеличении этих пунктов объёмы вычислений значительно возрастают и не позволяют получить решение за приемлемый промежуток времени. Если транспортную задачу усложнить тем, что пункты отправления не определены (наш случай) и их поиск также определяется оптимальными условиями, то такая задача становится не решаемой существующими методами линейного программирования за приемлемый промежуток расчетного времени. Совершенно очевидно, что поставленная нами задача будет чрезвычайно сложная для классического метода решения транспортной задачи. Это связано с тем, что выбор пункта разгрузки не определен, и вариантом выбора местоположения в географически рассматриваемой области может быть любая точка внутри этой области с учетом возможных ограничений, например, по глубине акватории, наличию течений и т.д. Количество таких точек не ограничено, поэтому расчетное время решения транспортной задачи методами линейного программирования будет чрезвычайно велико. Поэтому для решения предложенной задачи необходимо использовать аналитические модели.

Далее перейдем к решению нашей поставленной задачи. В рассматриваемой задаче необходимы следующие данные:  $a$  – объём производства (один пункт производства – это судно с грузом),  $b_j$  – объём потребления в пункте  $j$ ,  $c_{1,j}$  – затраты на перевозку единицы продукта от судна до пункта  $j$  при выбранном маршруте,

суммарное производство  $a = \sum_{j=1}^n b_j$  равно суммарному потре-

блению (весь необходимый груз должен быть вывезен с судна). Обозначим, как  $p_{1,j}$  – объём перевозок от судна до пункта  $j$ , при-

чем должно быть  $\sum_{j=1}^n p_{1,j} = a$  и  $p_{1,j} = b_j$ . Для решения нашей за-

дачи необходимо рассмотреть функцию стоимости  $z_1 = \sum_{j=1}^n c_{1,j} p_{1,j}$ .

Поскольку, для нашей задачи, естественно считать, что  $c_{1,j} = \frac{S_{1,j}}{m}$ , где  $S_{1,j}$  – затраты, а  $m$  – масса перевозимого груза за один раз вертолетом, то будем считать, что  $S_{1,j} = kl_{1,j}$ , где  $l_{1,j}$  – пройденный путь вертолета от судна до пункта  $j$  при перевозке необходимого груза массой  $m$ ,  $k$  – коэффициент пропорциональности. В итоге получим

$$z_1 = \frac{k}{m} \sum_{j=1}^n l_{1,j} p_{1,j}. \quad (12.1)$$

Выберем декартову систему координат – в рамках решаемой задачи из-за ограниченности расстояний вполне допустимо отказаться от географических координат, в которой зададим координаты пунктов  $j$ .

На рис. 12.1 приведен пример расположения пяти пунктов потребления (кружки), заданных декартовыми координатами и наилучшего положения судна (звездочка) для выгрузки вертолетом с учетом ограничения на положение судна (судно находится внутри области, ограниченной пунктирной линией).

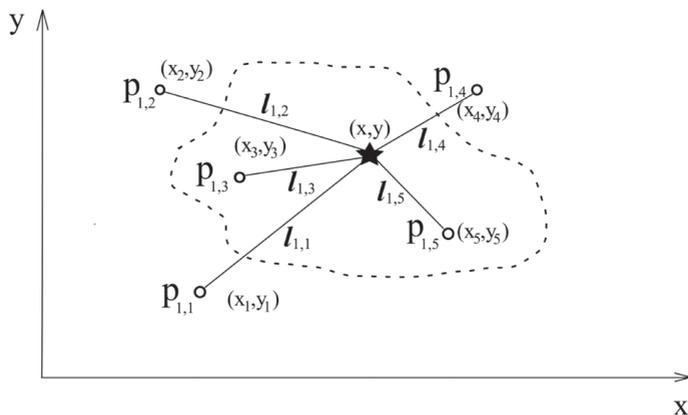


Рис. 12.1. Расположения пунктов потребления и наилучшего положения судна для выгрузки вертолетом с учетом ограничения на положение судна

Естественно считать, что для вертолета минимальный путь от судна до точки разгрузки – это прямая, тогда в этой системе координат  $l_{1,j} = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2}$ .

Если учесть, что во время вертолетной разгрузки стоимость работы судна уже другая, получим из (12.1) в итоге

$$z_1 = \left( \frac{k}{m} + \frac{Z_0}{v m} \right) \sum_{j=1}^n \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} p_{1,j}, \quad (12.2)$$

где  $v$  – скорость вертолета,  $Z_0$  – коэффициент, связывающий затраты за единицу времени.

Для того чтобы найти географическое место, необходимое для максимально быстрой разгрузки, пренебрегая стоимостью, необходимо ввести функцию времени

$$t_1 = \frac{1}{mv} \sum_{j=1}^n l_{1,j} p_{1,j}. \quad (12.3)$$

Далее рассмотрим второй вышеприведённый фактор, т.е. перевозку из точки отправления судна до точки его разгрузки вертолетом. В этом случае затраты и время на перевозку груза, соответственно, будут

$$z_2 = CL(x_0, y_0, x, y), \quad (12.4)$$

$$t_2 = \frac{C}{v_0} L(x_0, y_0, x, y), \quad (12.5)$$

где  $L(x_0, y_0, x, y)$  – пройденный путь судном до точки разгрузки, а  $C$  – коэффициент, связывающий затраты при перевозке судном груза на единицу пройденного пути,  $v_0$  – средняя скорость судна.

В итоге, объединяя оба фактора, получим, суммируя (12.2) и (12.4), что общие затраты при перевозке груза судном и вертолетом будут

$$z = \left( \frac{k}{m} + \frac{z_0}{vm} \right) \sum_{j=1}^n \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} p_{1,j} + CL(x_0, y_0, x, y). \quad (12.6)$$

Аналогично, суммируя (12.3) и (12.5) для общего времени, необходимого для перевозки груза от точки отправки судна до полной его разгрузки в пункты назначения, получим

$$t = \frac{1}{mv} \sum_{j=1}^n \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} p_{1,j} + \frac{L(x_0, y_0, x, y)}{v_0}. \quad (12.7)$$

Рассматриваемую задачу можно усложнить, например, в случае, когда положение судна ограничено определенной географической областью. Такая ситуация возможна, когда осадка судна не позволяет выходить за эти пределы из-за глубины или движение за границами невозможно из-за наличия береговой линии. В этом случае решение нужно искать внутри этой области. Следует добавить, что поиск оптимальной точки для затрат (12.6) и времени (12.7) с учетом налагаемых граничных условий – это не тривиальная задача, и решается она с помощью численных методов минимизации этих функции.

Несмотря на то, что по предложенному методу можно построить модель и найти оптимальное место для разгрузки судна, остается открытым вопрос о целесообразности самой применяемой модели. Необходимо проанализировать, насколько оптимальна точка для разгрузки в зависимости от параметров и по сравнению с другими вариантами. С экономической точки зрения, если говорить о стоимости, может существовать другой способ разгрузки, который будет менее затратным. В этом случае необходимо сравнить предложенный метод с другим способом разгрузки. Нас же интересует случай завоза в пункты по Северному морскому пути и западному сектору Арктики. В этом случае отсутствие достаточного количества портов и портопунктов, с одной стороны, небольших глубин в прибрежной зоне и состояния побережий – с другой, делает невозможным выгрузку судна на берег без использования вертолета. Поэтому единственной альтернативой нашему способу разгрузки (назовем его способом № 1) является подвоз груза судном к необходимой точке разгрузки и его выгрузка вертолетом на небольшом удалении (доступном по глубинам) от этой точки и т.д. по всем пунктам выгрузки, назовем этот способ № 2. Поэтому предложенный нами способ выгрузки необходимо сравнить со способом № 2. Для того чтобы их сравнить, необходимо

посчитать стоимость разгрузки нашим способом и способом № 2. Очевидно, что в определенном случае наш способ может быть более выгодным. Это произойдет, когда масса перевозимого груза

судном в пункты назначения  $\sum_{j=1}^n p_{1,j} = a$  меньше некоторой, на-

зовем эту массу критической и обозначим  $m_C$ , т.к. большая масса груза накладывает ограничения на применимость первого способа разгрузки. Другими словами, критическая масса  $m_C$  – это масса груза, перевозимая в пункты назначения, при которой наш способ выгрузки и способ № 2 дают одинаковую стоимость затрат. Эта масса  $m_C$  зависит от многих факторов, и в первую очередь от положения и количества пунктов выгрузки, береговой линии и массы груза  $p_{1,j}$  в точках выгрузки. Расчет  $m_C$  зависит от конкретной задачи.

Так же, аналогично функции затрат, можно ввести понятие критической массы  $m_T$  при поиске оптимальной точки выгрузки при минимизации временных затрат. Критическая масса  $m_T$  – это масса груза, перевозимая в пункты назначения, при которой наш способ и способ № 2 дают одинаковые временные затраты. Для того чтобы найти эти критические массы, необходимо перейти к конкретной задаче и продемонстрировать возможности нашей модели.

#### *Реализация модели для доставки грузов на гидрометеорологические станции в Обской губе Карского моря*

Рассмотрим пример, имеющий практическое значение по доставке грузов в районе Обской и Тазовской губ, где находятся значительные запасы природного газа, активно развивается добывающая и перерабатывающая индустрия. С учетом этого требуется максимальное быстрое развитие транспортной инфраструктуры в регионе [Тараканов, 2014; Шпак, Серова, Биев, 2014]. Необходимо доставить грузы в пункты Тамбей, Сеяху и Антипаюту, находящиеся в Обской и Тазовской губах, [Есеев, Коробов, Макаров, Матвеев, Тутыгин, 2017 (1); Есеев, Коробов, Макаров, Матвеев, Тутыгин, 2017; Eseev, Korobov, Makarov, Matveev, 2017] из точки отправления судна  $(x_0, y_0)$  (для упрощения расчётов – пролив Карские ворота) и после этого перейти в точку  $(x_1, y_1)$ , (рис. 12.2).

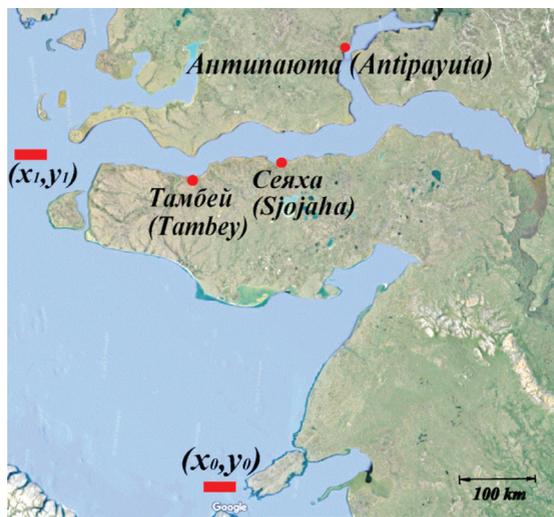


Рис. 12.2. Географическая область рассматриваемого примера с пунктами выгрузки

Выбор точки  $(x_1, y_1)$  определяется тем, что судно после разгрузки в этих пунктах может продолжить путь дальше, не возвращаясь обратно в исходную точку. Для корректности сравнения нашего способа выгрузки и способа № 2 пункт отправления и конечный пункт должны совпадать для этих способов, что мы и сделали. Рассмотрим разные варианты доставки необходимых грузов. В этой задаче есть ограничения на область нахождения судна из-за распределения глубин и береговой линии. Оптимальные точки положения судна ищутся в каждом случае по процедуре, описанной выше, с учетом безопасных глубин и расположения береговой линии, при минимизации уравнений для затрат по стоимости (12.6) и для временных затрат (12.7). Расчет стоимости исходил из данных по средней цене аренды вертолёта, которая равна 170000 руб./час, по средней скорости движения при работе – 170 км/час. По средней полезной грузоподъемности вертолёта при перевозке за один раз 2 тонны (взяты приблизительные характеристики работы вертолета Ми-8Т). Судно, перевозящее груз, – НЭС «Михаил Сомов». Были использованы следующие данные этого судна: стоимость работы в сутки 833000 руб., если судно стоит, то стоимость судо-

суток 175000 руб., средняя скорость судна – 15 км/ч. При расчете способом № 2 считаем, что судно подходит к каждому пункту выгрузки на среднее расстояние 10 км.

Для проведения расчётов была проведена оцифровка области, представленной на рис. 12.2, т.е. были сняты координаты побережья. Конечно, при численном расчете оптимальных вариантов разгрузки все решения должны находиться внутри оцифрованной области. Следует добавить, что эта задача не тривиальная, даже с математической точки зрения. Именно поэтому была написана программа с использованием пакета Wolfram Mathematica 11. Эта программа позволяла проводить минимизацию аналитических функций (12.6) и (12.7) внутри оцифрованной области. Также следует добавить, что функция  $L(x_0, y_0, x, y)$  в выражениях является также не тривиальной. Поскольку  $L(x_0, y_0, x, y)$  является путём, пройденным судном до оптимальной точки, то эта зависимость должна содержать саму оптимальную точку  $(x, y)$ . Это, в свою очередь, означает, что судно до этой точки должно двигаться по некоторой траектории. Эту траекторию, в строго математическом смысле, можно найти, используя вариационное исчисление,

поскольку  $L(x_0, y_0, x, y) = \int_{x_0}^x \sqrt{1 + Y'(x, y, x_0, y_0)} dx$ , где  $Y$  – ордина-

та пройденного пути. Для этого необходимо потребовать, чтобы  $L(x_0, y_0, x, y)$  была минимальной. Поиск этой ординаты  $Y$  в случае сложной области её значений (оцифрованная область) – очень сложная задача вариационного исчисления, которая может быть решена только численными методами. Кроме того, наша задача комбинированная, поскольку надо искать не сам минимум  $L(x_0, y_0, x, y)$ , а минимумы выражений (12.6) и (12.7). Эту проблему можно обойти, если оцифрованную область разбить на такие области, внутри которых судно может двигаться по прямой линии. В этом случае известно, что траектория – это прямая линия. Минимум выражений (12.6) и (12.7) ищется внутри этой области, после чего программа переводит поиск минимума в другую область и т.д., затем сравниваются минимумы, и ищется одно минимальное решение задачи.

Сначала приведём результаты расчётов для критической массы  $m_c$  по стоимости затрат на доставку груза для сравнительно

небольшого распределения грузов между пунктами. Для этого по-

строим график функции  $\frac{z}{z_V}$  ( $z_V$  – стоимость доставки груза спосо-

бом № 2,  $z$  – стоимость доставки груза нашим способом (из расчетной точки, т.е. при минимизации функции (12.6)) как функция от массы  $M$  перевозимого груза. На рис. 12.3 изображена функция

$\frac{z}{z_V}$  для 4 случаев перевозки груза массой  $M$ . Первый случай соот-

ношения масс доставки в пункты назначения: Тамбей –  $m_1 = M/3$ , Сеяху –  $m_2 = M/3$  и Антипаюту –  $m_3 = M/3$ . Второй случай соотношения масс доставки в пункты назначения: Тамбей –  $m_1 = M/4$ , Сеяху –  $m_2 = M/2$  и Антипаюту –  $m_3 = M/4$ . Третий случай соотношения масс доставки в пункты назначения: Тамбей –  $m_1 = M/2$ , Сеяху –  $m_2 = M/4$  и Антипаюту –  $m_3 = M/4$ . Четвертый случай соотношения масс доставки в пункты назначения: Тамбей –  $m_1 = M/4$ , Сеяху –  $m_2 = M/4$  и Антипаюту –  $m_3 = M/2$ .

Также приведем значения общей критической массы: в первом случае –  $m_c = 25$  т, во втором случае –  $m_c = 35$  т, в третьем случае –  $m_c = 23,2$  т, в четвертом случае –  $m_c = 20,8$  т.

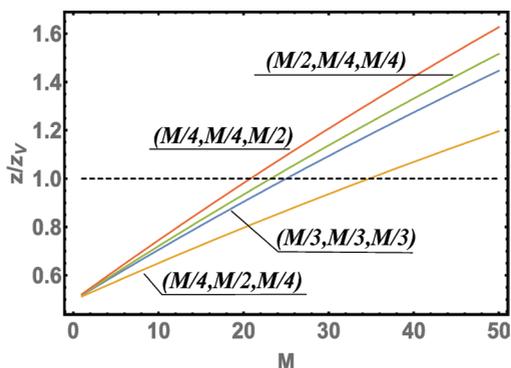


Рис. 12.3. Зависимость  $\frac{z}{z_V}$  от массы перевозимого груза  $M$  (в тоннах)

в пункты выгрузки ( $m_1, m_2, m_3$ ), где массы перевозимого груза:  
 $m_1$  – в Тамбей,  $m_2$  – в Сеяху,  $m_3$  – в Антипаюту

Приведем аналогичный расчет в случае оптимизации времени.

Для этого построим график функции  $\frac{t}{t_V}$  ( $t_V$  – время доставки груза способом № 2,  $t$  – стоимость доставки груза нашим методом, т.е. при минимизации функции (12.7)) как функции от массы  $M$  перевозимого груза. На рис. 12.4 изображена функция  $\frac{t}{t_V}$ , для 4 случаев перевозки груза массой  $M$  (те же случаи, что и на рис. 12.3).

Также приведем значения критической массы: в первом случае –  $m_T = 210$  т, во втором случае –  $m_T = 437,5$  т, в третьем случае –  $m_T = 188,3$  т, в четвертом случае –  $m_T = 150$  т.

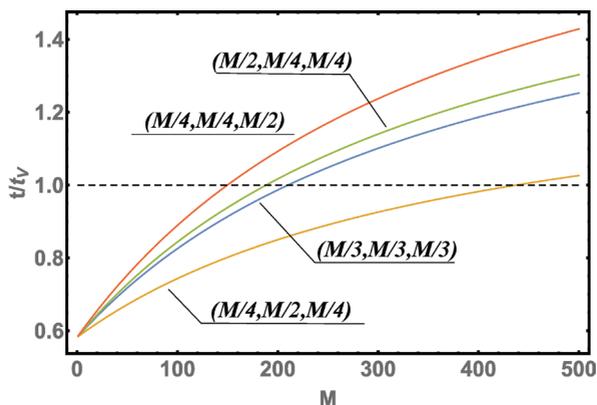


Рис. 12.4. Зависимость  $\frac{t}{t_V}$  от массы перевозимого груза  $M$  (в тоннах) в пункты выгрузки ( $m_1, m_2, m_3$ ), где массы перевозимого груза:  $m_1$  – в Тамбей,  $m_2$  – в Сеяху,  $m_3$  – в Антипаюту

Из рис. 12.3 можно увидеть, что существует критическая масса  $m_c$ , меньше которой выгоднее по стоимости перевозить груз нашим способом. Причем эта выгода может быть очень большой, если масса перевозимого груза  $M$  сравнительно невелика. Если учесть, что завозимый груз в Обскую и Тазовскую губы для рассмотренных пунктов может быть небольшим (например, для

обеспечения функционирования гидрометеостанций), т.е. меньше критической массы, то рассмотренный метод является единственным экономически целесообразным.

Произведем расчет критической массы по соображениям временных затрат. Данные представлены на рис. 12.4, откуда можно увидеть, что критическая масса  $m_T$  является значительно больше, чем в предыдущем случае. Поэтому предложенный способ для быстрой операции разгрузки-погрузки часто является единственным. Причем этот способ дает очень большую временную выгоду или временной выигрыш, даже при значительном объеме перевозимых грузов.

Также представим результаты другого моделирования, более детального в поиске принципиально новых распределений грузов и в сравнении со сделанными расчетами. Результаты расчета представлены на рис. 12.5. В случае этого моделирования изображена функция  $\frac{z}{z_V}$  для 7 случаев перевозки груза массой  $M$ . Пер-

вый случай соотношения масс доставки в пункты назначения: Тамбей –  $m_1 = M/3$ , Сеяху –  $m_2 = M/3$  и Антипаюту –  $m_3 = M/3$ .

Второй случай соотношения масс доставки в пункты назначения: Тамбей –  $m_1 = M/4$ , Сеяху –  $m_2 = M/2$  и Антипаюту –  $m_3 = M/4$ .

Третий случай соотношения масс доставки в пункты назначения: Тамбей –  $m_1 = M/2$ , Сеяху –  $m_2 = M/4$  и Антипаюту –  $m_3 = M/4$ .

Четвертый случай соотношения масс доставки в пункты назначения: Тамбей –  $m_1 = M/4$ , Сеяху –  $m_2 = M/4$  и Антипаюту –  $m_3 = M/2$ .

Пятый случай соотношения масс доставки в пункты назначения: Тамбей –  $m_1 = \frac{2}{3}M$ , Сеяху –  $m_2 = M/6$  и Антипаюту –  $m_3 = M/6$ .

Шестой случай соотношения масс доставки в пункты назначения: Тамбей –  $m_1 = M/6$ , Сеяху –  $m_2 = \frac{2}{3}M$  и Антипаюту –  $m_3 = M/6$ .

Седьмой случай соотношения масс доставки в пункты назначения: Тамбей –  $m_1 = M/6$ , Сеяху –  $m_2 = M/6$  и Антипаюту –  $m_3 = \frac{2}{3}M$ .

Седьмой случай соотношения масс доставки в пункты назначения: Тамбей –  $m_1 = M/6$ , Сеяху –  $m_2 = M/6$  и Антипаюту –  $m_3 = \frac{2}{3}M$ .

$m_3 = \frac{2}{3}M$ .

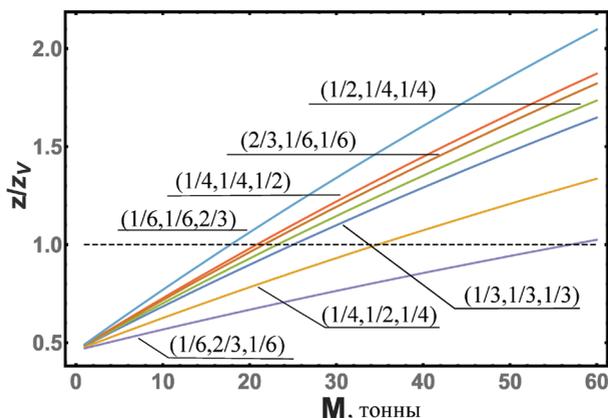


Рис. 12.5. Зависимость  $\frac{z}{z_v}$  от массы перевозимого груза  $M$  (в тоннах)

в пункты выгрузки  $(m_1, m_2, m_3)$ , где массы перевозимого груза:

$m_1$  – в Тамбей,  $m_2$  – в Сеяху,  $m_3$  – в Антипаюту

Приведем значения общей критической массы: в первом случае –  $m_c = 25$  т, во втором –  $m_c = 35$  т, в третьем –  $m_c = 23,2$  т, в четвертом –  $m_c = 20,8$  т, в пятом –  $m_c = 21,6$  т, в шестом –  $m_c = 60$  т, в седьмом –  $m_c = 17,8$  т.

Приведем аналогичный расчет в случае оптимизации времени.

Для этого построим график функции  $\frac{t}{t_v}$  ( $t_v$  – время доставки груза

способом № 2,  $t$  – стоимость доставки груза нашим методом, т.е. при минимизации функции (12.7)) как функции от массы  $M$  пере-

возимого груза. На рис. 12.6 изображена функция  $\frac{t}{t_v}$ , для 7 случаев

перевозки груза массой  $M$  (те же случаи, что и на рис. 12.5).

Приведем значения критической массы: в первом случае –  $m_T = 210$  т, во втором –  $m_T = 437,5$  т, в третьем –  $m_T = 188,3$  т, в четвертом –  $m_T = 150$  т, в пятом –  $m_c = 167$  т, в шестом –  $m_c$  не существует в принципе, в седьмом –  $m_c = 114$  т.

Из рис. 12.5 можно увидеть, что существует критическая масса  $m_c$ , меньше которой выгоднее по стоимости перевозить груз нашим способом. Причем эта выгода может быть очень большой, если масса перевозимого груза  $M$  сравнительно не велика. Если учесть, что завозимый груз в Обскую и Тазовскую губы для рассмотренных пунктов может быть небольшим (например, для обеспечения функционирования гидрометеостанций), т.е. меньше критической массы, то рассмотренный метод является единственным экономически целесообразным.

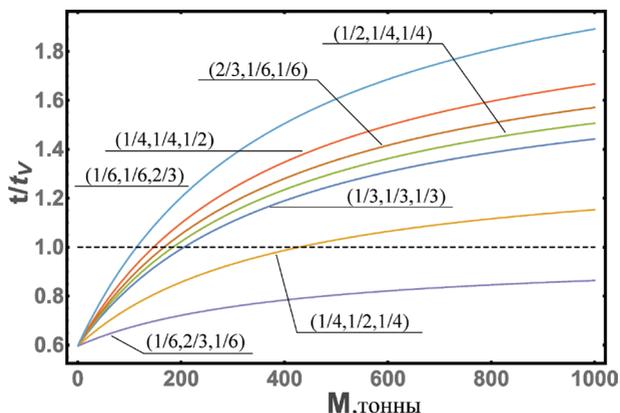


Рис. 12.6. Зависимость  $\frac{t}{t_v}$  от массы перевозимого груза  $M$  (в тоннах)

в пункты выгрузки ( $m_1, m_2, m_3$ ), где массы перевозимого груза:  $m_1$  – в Тамбей,  $m_2$  – в Сеяху,  $m_3$  – в Антипаюту

По рис. 12.6 можно увидеть, что критическая масса  $m_r$  является значительно больше, чем в предыдущем случае. Кроме того, в шестом рассмотренном случае график функции не пересекает пря-

мую  $\frac{t}{t_v} = 1$ , а имеет максимальное значение  $\frac{t}{t_v} = 0,968$ . Это зна-

чит, что наш способ всегда будет наиболее выгодным, несмотря на перевозимую массу груза. Поэтому предложенный способ для быстрой операции разгрузки-погрузки часто является единствен-

ным. Причем этот способ дает очень большую временную выгоду или временной выигрыш, даже при значительном объеме перевозимых грузов.

В качестве примера найдем географическое положение судна, выгрузка которого будет идти с минимальными затратами по стоимости и по времени с расчетом стоимости и с учетом аренды вертолета и судна. Рассмотрим сначала задачу о минимизации стоимости перевозки. Для этого необходимо взять массу перевозимого груза меньше  $m_c$ . Для этого выберем общую массу перевозимого груза  $M = 24$  т, причем в Тамбей  $m_1 = 6$  т, в Сеяху  $m_2 = 12$  т и в Антипаюту –  $m_3 = 6$  т. Для этих параметров критическая масса  $m_c = 35$  т. В результате расчета получим, что выгоднейшее место для разгрузки судна вертолетом будет находиться вблизи Сеяхи, затраты будут  $z = 8,18 \times 10^6$  рублей. При этом затраты при доставке груза способом № 2 будут  $z = 9,8 \times 10^6$  рублей. Также следует добавить, что, кроме выигрыша по стоимости перевозки груза, будет выигрыш и по времени порядка 25%.

Теперь рассмотрим случай быстрой доставки, т.е. доставки за минимальное время. Выберем те же параметры, что и в предыдущей задаче. В результате расчета был получен результат, представленный на рис. 12.7. Оптимальная точка выгрузки теперь значительно смещается от Сеяхи. Причем время доставки нашим методом  $t = 148$  часов, а время доставки способом № 2  $t = 276$  часов. Из представленных расчетов видно, что выигрыш по времени велик и составляет более 5 суток. Следует добавить, что выигрыш по времени не всегда связан с проигрышем по стоимости. Быстрое время доставки необходимо в экстренных случаях, там, где промедление может принести большие затраты, например, на последующую эвакуацию персонала станции из-за отсутствия продуктов и ГСМ. Именно поэтому быстрая доставка грузов является необходимой частью логистики Северного морского пути с учетом ограничений на период навигации, сложными погодными условиями, слабой развитостью инфраструктуры.

Несмотря на то, что с помощью предложенного метода расчета можно найти лучшее географическое положение для разгрузки судна, возникает ряд проблем. Не всегда возможно добраться до заданного места разгрузки, чтобы разгрузить судно. Это связано с различными факторами, которые не всегда могут быть учтены,

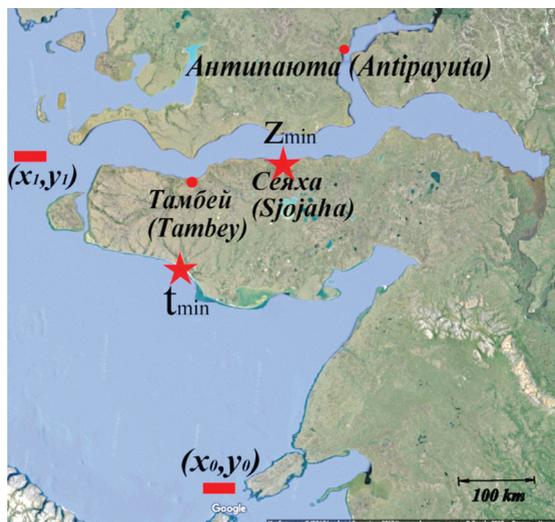


Рис. 12.7. Географическое место для самой выгодной по цене  $z_{\min}$  и времени  $t_{\min}$  доставки грузов

например, при плохих погодных условиях, мелководье, изменении фарватера, ледовой обстановке и других влияющих на судоходство обстоятельствах. Эти препятствия могут возникать непосредственно от момента движения судна до точки разгрузки. В этом случае необходима оперативная реакция на текущую ситуацию. Задержки в ответе влекут за собой существенные потери финансового характера. Кроме того, необходимо искать новую точку выгрузки, но в текущей ситуации ее сложно найти. Руководитель (менеджер), принимающий решение о выгрузке, нуждается в оперативной помощи, которая может быть ему быстро и своевременно оказана путём моделирования ситуации. В этом случае также помогут контурные карты (карта-схема) экономической и временной выгоды. Они состоят из отображения географического района, который включает в себя оптимальную точку выгрузки, где указаны экономические или временные показатели возможной точки разгрузки судна. В качестве примера мы покажем варианты выгрузки в Обской и Тазовской губах для сравнения выгоды по стоимости перевозки и времени по нашему способу. Результаты расчетов изображены на рис. 12.8–12.11; звездочкой обозначено наиболее

выгодное место для разгрузки, расчет для экономической выгоды приведен в миллионах рублей, для временной – в часах.

На представленных рисунках по цветовой гамме можно увидеть, где с минимальными потерями по стоимости или времени можно разгрузить судно. Чем темнее, тем выгоднее. Также удобно и

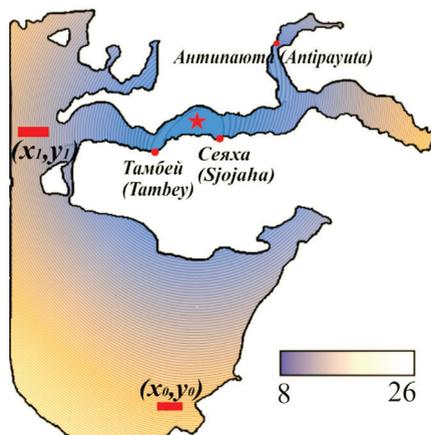


Рис. 12.8. Контурная карта-схема экономической выгоды (млн руб.) при перевозке груза в Тамбей – 8 т, Сеяху – 4 т, Антипаяуту – 8 т

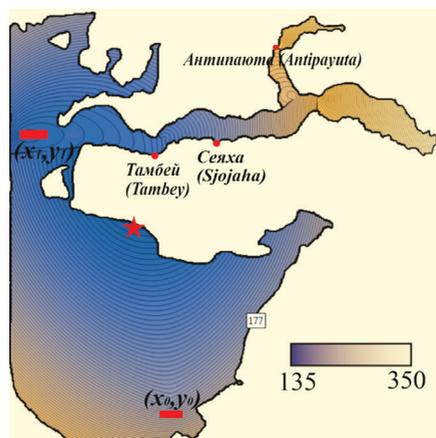


Рис. 12.9. Контурная карта-схема временной выгоды (ч) при перевозке груза в Тамбей – 8 т, Сеяху – 4 т, Антипаяуту – 8 т

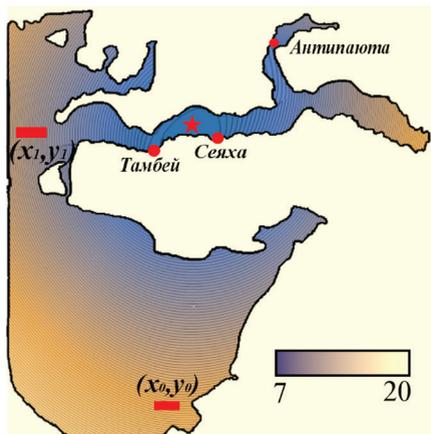


Рис. 12.10. Контурная карта-схема экономической выгоды (млн руб.) при перевозке груза в Тамбей – 6 т, Сеяху – 2 т, Антипаюту – 6 т

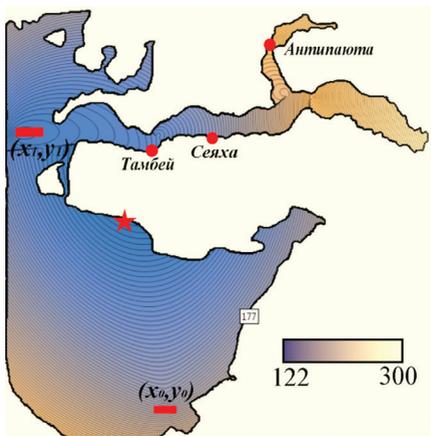


Рис. 12.11. Контурная карта-схема временной выгоды (ч) при перевозке груза в Тамбей – 6 т, Сеяху – 2 т, Антипаюту – 6 т

достаточно легко проанализировать и сделать выводы о выборе места разгрузки с использованием изолиний (черные линии на рисунках) – линии одинаковой экономической или временной выгоды. Эти линии означают, что, двигаясь вдоль выбранной линии, то есть изолинии, стоимость или время разгрузки будут одинаковы,

несмотря на различное географическое расположение точки разгрузки судна. Выгода может исчисляться десятками миллионов рублей в одном рейсе.

Можно увидеть, что анализ поиска места для разгрузки судна, если оно не может находиться в оптимальной точке, достаточно прост. Такие карты удобны в оперативном использовании на судне руководителем (супервайзером, менеджером), ответственным за разгрузку судна, который может найти оптимальное место или набор мест для разгрузки, а также оценить экономические или временные затраты в каждой конкретной ситуации.

Задача может быть инвертирована с выгрузки на погрузку, когда может измениться средство доставки – например, плашкоуты, и в построенной модели можно осуществлять расчет оптимальной точки загрузки для любого заданного количества пунктов и их положения. При моделировании в качестве дополнительных условий можно учесть глубину вблизи берега и особенности ледовой обстановки в точке выгрузки.

## Глава 13

### Размещение морских нефтяных терминалов

Терминалы составляют важную часть транспортной инфраструктуры, обеспечивающую вывоз нефти, добываемой на суше, морским путем. Такие варианты транспортировки становятся основными, когда месторождения находятся недалеко от моря, а строительство магистральных трубопроводов слишком дорого, что имеет место в северных и, особенно, в арктических регионах.

Рассмотрим в полном объеме задачу размещения нефтяных отгрузочных терминалов на морской акватории в западном секторе Арктики для обеспечения вывоза нефти из северной части Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции [Коробов, 2006].

**ДЕКОМПОЗИЦИЯ СИСТЕМ В ВИДЕ ИЕРАРХИИ.** Любую систему можно структурировать в виде иерархии. Применительно к такого рода задачам структуру системы можно представить следующим образом (рис. 13.1).

Как известно, наиболее важным моментом составления любой иерархии является определение цели [Коробов, Тутыгин, 2010]. От

выбора цели прямо и косвенно зависят все остальные элементы иерархии, поскольку одни и те же элементы системы будут играть различную роль в конечном результате. Так, например, одно дело, когда ландшафты оцениваются с точки зрения их рекреационного использования, и совершенное иное, когда те же самые ландшафты рассматриваются с позиции воздействия на них промышленного предприятия и для потребностей сельского хозяйства.

Процедуру анализа систем можно представить состоящей из следующих уровней, составляющих восходящую к выбранной цели иерархию.

- **Анализ природных условий и экологической ситуации.**

Основными задачами исследования природных условий являются: определение ключевых компонентов природной системы, их пространственно-временной изменчивости и особенностей функционирования природных компонентов территории.

- **Определение влияющих факторов.**

На основании проведенного анализа состояния территории, в соответствии с целями решаемой задачи, необходимо выделить влияющие факторы. Для решения поставленной задачи они должны удовлетворять следующим требованиям:

1. охватывать все условия, влияющие на конечный результат;
2. не дублировать, полностью или частично, друг друга; одной причине, влияющей на принятие решения, должен отвечать один фактор;
3. по возможности, носить интегральный характер, т.е. быть наиболее информативными, с наибольшей степенью полноты характеризовать процесс или явление;
4. выражаться количественными или качественными характеристиками.

В общем, количество факторов не ограничивается, но все же их не следует выбирать слишком много. В тех случаях, когда по объективным причинам этого избежать не удастся, представляется целесообразным объединение факторов в генетические группы (что и будет сделано далее).

- **Определение критериев оценки факторов и показателей, характеризующих факторы.**

Для количественной оценки факторов необходимо разработать соответствующие характеристики – критерии оценки факторов и

показатели, характеризующие факторы. Выбор критериев измеряемых величин в определенной степени определяется целями классификации, поскольку одну и ту же измеряемую величину (фактор) можно охарактеризовать несколькими величинами. Поэтому подбор критериев и показателей должен основываться на тщательном анализе характеристик факторов, чтобы в максимальной степени отражать влияние факторов на природную среду и параметры системы. В принципе, можно использовать только одни показатели, хотя это и не всегда целесообразно при анализе сложных объектов.

Вторым не менее важным условием выбора критериев и показателей является состояние информационной базы, а также возможность получения требуемых данных. При отсутствии требуемой информации критерии и показатели должны быть пересмотрены, в противном случае они теряют смысл при практической реализации экспертных методов.

Выбор числовой или статистической характеристики, наиболее пригодной для описания рассматриваемого явления в контексте решаемой задачи, и составляет суть выбора *показателя*. В качестве показателей могут использоваться различные величины. Однако в некоторых случаях, когда речь идет о качественных характеристиках объекта, показатели и критерии могут выражаться в одних понятийных единицах.

- **Группировка влияющих факторов.**

Когда количество факторов велико – несколько десятков, их целесообразно разбить на группы в соответствии с их происхождением. Обычно такое разбиение не представляет большого труда и во многих задачах происходит естественным образом. В основу группировки проще всего положить принадлежность факторов к соответствующему компоненту природной среды – атмосфере, гидросфере, литосфере и т.д. – и социально-экономической сферы. При необходимости могут быть сформированы специальные группы, объединяющие военные, технические, геополитические и другие факторы. Число факторов в группах будет различным, но это обстоятельство не имеет принципиального значения. В сложных системах внутри групп могут образовываться подгруппы, но все же не стоит слишком усложнять иерархию. Для большинства задач будет достаточной двухуровневая система соотношения влияющих факторов, состоящая из групп и межгрупповых связей.

• **Расчет балльных оценок показателей, характеризующих влияющие факторы.**

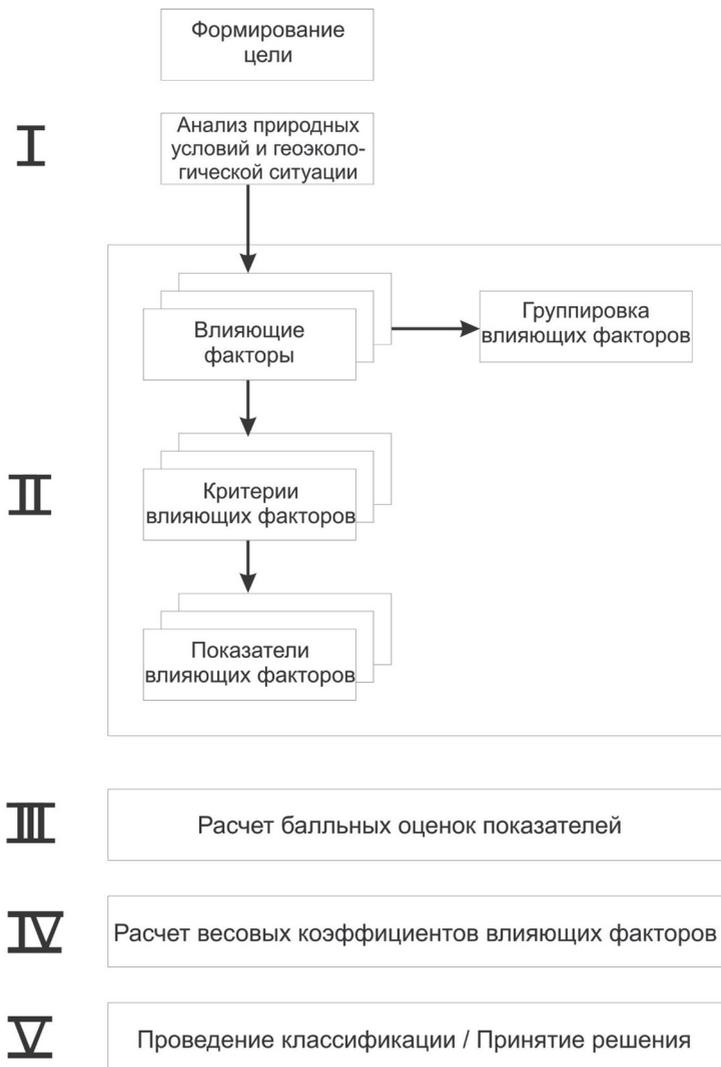


Рис. 13.1. Декомпозиция географической системы для проведения классификации объектов и принятия управленческих решений

Технически процедура присвоения балльных оценок осуществляется посредством построения соответствующих шкал [Коровов, 2002]. Исследуемой величине, попавшей в определенный интервал или соответствующей определенному набору признаков, присваивается соответствующий балл. При этом, в зависимости от характера самой величины, балльная оценка может быть как целой, так и дробной.

Диапазон изменчивости всех природных характеристик зависит от рассматриваемой территории, и поэтому шкалы показателей должны быть регионально ориентированы, т.е. их границы должны устанавливаться исходя из предельной изменчивости природных характеристик или их расчетных значений.

Сколько должно быть интервалов шкалы, нет единого мнения. Наиболее часто разными исследователями при разработке количественных шкал рекомендуется выбирать от 5 до 11 интервалов. В качественных же шкалах количество интервалов может быть, как меньшим, так и большим. Чтобы избежать искажения балльных оценок, количество интервалов должно быть принято одинаковым для всех типов шкал, для чего в качественные шкалы необходимо вводить соответствующие масштабные множители. В противном случае могут создаваться ситуации, когда факторы с большими (за счет большего числа интервалов) балльными оценками будут давать больший вклад в конечный результат, и наоборот.

- **Проведение опроса экспертов.**

Опрос экспертов может быть организован и проведен, как отмечено нами выше, по-разному. Чаще всего его проводят в несколько туров, чтобы сблизить позиции экспертов [Острейковский, 1997], но в силу перечисленных в главе 10 причин, нам такой подход представляется, по меньшей мере, нерациональным. Поэтому мы остаёмся при своём мнении проводить опрос анонимно и в один тур.

- **Вычисление весовых коэффициентов.**

Нахождение весовых коэффициентов представляет собой технический вопрос, разобранный нами в главе 10. Здесь только повторим, что, с нашей точки зрения, предпочтительнее находить весовые коэффициенты ранжированием факторов, либо методом анализа иерархий, но без использования отношения согласованности, которое может привести, и часто приводит, к потере информации.

• **Расчет балльных оценок показателей факторов с учетом их весовых коэффициентов.**

Балльные оценки факторов и весовые коэффициенты позволяют в наиболее простом виде оценить варианты по их приоритетности. Для этого необходимо просуммировать балльные оценки, умноженные на их весовые коэффициенты. Поскольку при решении данной задачи факторы разбивались на группы, то частные суммы (по каждой группе факторов) также должны умножаться на соответствующие весовые коэффициенты.

Суммарные балльные оценки  $I_{R,L}$  для каждого объекта подсчитываются по формуле, имеющей следующий вид:

$$I_{R,L} = \sum_{j=1}^R k_j \sum_{i=1}^n k_{ij} p_i, \quad (13.1)$$

где  $L = 1 \dots m$  – количество объектов,  $k_{ij}$  – вес фактора,  $p_i$  – значение фактора, выраженное в баллах,  $i = 1 \dots n$  – количество факторов,  $k_j$  – весовые коэффициенты групп факторов,  $j = 1 \dots R$  – количество групп.

Ещё раз отметим, что число сумм в выражении (13.1) может быть и большим и зависит от сложности иерархии системы.

Теперь по рассмотренной методологии можно провести исследование альтернативных вариантов транспортировки нефти за пределы северной части Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (ТПНГП).

Развитие нефтяного комплекса этого региона сдерживает отсутствие развитой транспортной инфраструктуры. С учетом того, что непосредственно в Ненецком автономном округе (НАО) и граничащими с ним регионах нет достаточного количества потребителей нефтепродуктов, нефть для переработки необходимо вывозить за пределы региона, перед компаниями, ведущими добычу нефти и обладающими лицензиями на месторождения, остро стоит задача создания эффективной инфраструктуры, способной в полной мере удовлетворить запросы отрасли.

Расположение большого количества месторождений, с одной стороны, в относительной близости от морского побережья и на континентальном шельфе Северного Ледовитого океана, а с другой – удаленность их от идущих в южном направлении магистральных трубопроводов, делает возможным вывоз добываемой

нефти морским путем. В этом случае нефтетранспортная система состоит из двух частей: сухопутной – от месторождений к побережью и морской – от побережья к рынкам сбыта.

Основные объекты сухопутной транспортной системы включают: межпромысловые и магистральные трубопроводы, резервуарные парки, насосно-перекачивающие станции (НПС), вахтовые поселки, складские помещения и производственные базы.

Основные объекты морской транспортной системы состоят из: подводных трубопроводов, резервуарных парков, береговых НПС, отгрузочного терминала, танкерного и вспомогательного флота и плавучего нефтехранилища.

Транспортировка нефти относится к опасным для окружающей среды видам деятельности. В случае несоблюдения требований к безопасности строительства и эксплуатации объектов нефтяной транспортной инфраструктуры и учитывая высокую уязвимость арктических экосистем к внешнему воздействию, последствия для природной среды и социальной сферы могут быть весьма тяжелыми и ощущаться в течение многих лет. Когда же негативному воздействию подвергаются сразу несколько компонентов, особенно во время аварийных разливов, изменения в экосистемах могут принять необратимый характер.

Для всех без исключения компонентов природной среды характерна пространственная и временная изменчивость, и чем больше рассматриваемая территория, тем больше диапазон изменчивости. Из этого вытекает, что в различных местах территории НАО и акватории омывающих ее морей природные условия в разной степени будут оказывать влияние на объекты транспортной инфраструктуры. То же можно сказать и о влиянии транспортировки нефти на природную среду: чувствительность ее к антропогенному воздействию неодинакова и обуславливается многими причинами – восприимчивостью к нефтяному загрязнению, наличию мест, играющих важную роль в биологии видов, и целым рядом других факторов. Таким образом, природные и экологические условия в значительной мере могут повлиять на решение о выборе трубопроводных трасс и места расположения погрузочных терминалов.

Учет природных и экологических факторов, помимо сохранения среды обитания в первозданном виде, имеет и сугубо эко-

номическую основу: чем жестче природные условия и выше уязвимость экосистем, тем выше капитальные затраты и эксплуатационные расходы на обеспечение инженерной безопасности и природоохранные мероприятия. Поэтому за счет оптимального выбора трассы магистрального трубопровода и места расположения отгрузочного терминала можно существенным образом сократить стоимость проекта. Цена оптимизации – выигрыш в сотни миллионов долларов.

Отдавая должное этим фактам, законодательством многих стран (и российским в том числе) при проектировании крупных объектов, связанных с крупномасштабным воздействием на окружающую среду, в ходе инвестиционного процесса в *обязательном порядке* предусматривается рассмотрение нескольких альтернатив реализации намечаемой деятельности.

Сформулируем правила, которыми возможно руководствоваться при генерации альтернатив расположения объектов нефтяной транспортной инфраструктуры, прохождения трасс магистральных трубопроводов и маршрутов танкеров [Коробов, 2005].

**Правило 1.** Поскольку уровень современных технологий позволяет строить и эксплуатировать нефтетранспортные системы в самых неблагоприятных природных условиях, *теоретически возможно рассмотрение любых вариантов размещения объектов*. Другими словами, такие препятствия, как крупные реки, заболоченная местность, многолетнемерзлые породы, абразионные берега, морские льды и т.д. не являются препятствием для прокладки трубопроводов, функционирования терминалов и танкерного флота. Большие затраты на строительство и эксплуатационные расходы могут быть перекрыты другими факторами, такими как приближение к рынкам сбыта, сокращение протяженности трубопроводов, снижением риска экологической опасности вследствие существенного сокращения длины трассы.

**Правило 2.** *Исходная точка начала нефтетранспортной системы должна находиться на крупном месторождении или в центральном пункте сбора группы месторождений*. Это позволит магистральный трубопровод сделать из труб большего диаметра и, следовательно, улучшить удельные экономические показатели всей транспортной системы.

**Правило 3. *Магистральные трубопроводы должны пролежать таким образом, чтобы в максимальной степени обеспечить прием нефти от других, находящихся поблизости от трассы месторождений.*** Даже если это приводит к удорожанию данного проекта, в стратегическом плане это перспективнее, поскольку удешевит проекты разработки прилегающих к трассе других месторождений. Кроме того, владельцам системы можно зарабатывать и на сдаче в аренду ее части. Из этого положения вытекает возможность удаленного расположения терминалов от исходной точки магистрального нефтепровода, даже если при этом увеличивается протяженность судоходных трасс.

**Правило 4. *Места расположения трубопроводов, промышленных объектов, переходов через водные преграды и морские берега должны выбираться таким образом, чтобы влияние природных и экологических условий на них было, по возможности, минимальным.*** Это правило служит дополнением к правилу 1, когда направление уже выбрано. Однако даже на ограниченных площадях разнообразие природных условий и уровня загрязнения может оказаться столь большим, что, если исходить из концепции кратчайших расстояний для прокладки трубопроводов, можно встретить сразу несколько природных объектов, затраты на инженерную и экологическую защиту которых могут превзойти стоимость увеличения протяженности трубопровода за счет обхода участков повышенного риска. Поэтому лучше сразу обходить такие зоны, хотя если ограничения в них не носят безусловный характер, а сами зоны достаточно обширны, и их обход приведет к существенному удорожанию строительства, то не исключается рассмотрение подвариантов – обходного и прямого, поскольку прямой ответ, что предпочтительней, не очевиден.

**Правило 5. *Места расположения терминалов должны соответствовать требованиям Постановления Правительства РФ № 44 от 19 января 2000 г.*** [Постановление Правительства РФ № 44 от 19 января 2000], п. 2 которого гласит: «Искусственные острова, сооружения и установки не могут создаваться на признанных морских путях, имеющих существенное значение для судоходства, а также в местах, имеющих особо важное значение для рыболовства и воспроизводства морских биологических ресур-

сов». Это требование носит очевидный характер и в комментариях не нуждается.

**Правило 6. *Расположение терминалов должно учитывать возможности хранения нефти (на берегу или непосредственно на терминале), особенности погрузочных операций и удаленность от рынков сбыта.*** Техническая возможность строить терминалы с хранилищем существенным образом улучшает экономические показатели проекта, поскольку позволяет увеличить интенсивность танкерных перевозок: пока танкер загружается, хранилище может наполняться новой нефтью, а значит, уменьшается время ожидания для следующего танкера. Приближение терминала к основным рынкам сбыта для некоторых регионов позволяет также улучшить экономические показатели транспортной системы. Так, в пределах юго-восточной части Баренцева моря терминал может быть расположен в любой точке акватории, но расстояние между крайними точками при этом будет измеряться сотнями километров. К тому же чем дальше на восток, тем более тяжелые ледовые условия. А это влияет на время нахождения танкеров на трассе, поскольку во льдах скорость движения замедляется. К тому же возрастает риск аварий.

**Правило 7.** Поскольку на основании проводимого в ходе инженерных изысканий анализа влияющих факторов известны ограничения, носящие безусловный характер, ***при генерации альтернатив не должны предлагаться заведомо нереализуемые варианты.*** К таким ограничениям, например, относятся наличие особо охраняемых природных территорий, статус которых запрещает ведение любой хозяйственной деятельности (заповедники, национальные парки). Другим примером являются участки морских акваторий, в пределах которых запрещены дноуглубительные работы и работы, связанные с касанием грунта, полностью исключаящие строительство терминалов и прокладку трубопроводов в них до тех пор, пока статус данных районов не будет изменен. К этому можно добавить исключение прохождения трубопроводных трасс через населенные пункты с целью минимизации последствий возможных катастроф [Лотош, 2003].

Сформулированные правила, естественно, не являются единственно возможными, но их применение в определенной степени поможет структурировать процесс генерации альтернатив.

На основании существующих проектов транспортировки нефти за пределы северной части Тимано-Печорской провинции и данных литературных источников рассмотрим 10 вариантов размещения терминала и, следовательно, такое же количество альтернатив организации системы транспортировки нефти (рис. 13.2.). За исходную точку выбрано одно из наиболее крупных месторождений – Южно-Хыльчуйское месторождение, хотя с таким же успехом можно выбрать и любое другое. Для сравнимости вариантов принято, что конечным пунктом транспортировки нефти будет порт Печенга на Кольском полуострове, откуда далее нефть будет транспортироваться потребителям в Европе и Северной Америке супертанкерами. Цифрами на карте обозначены варианты: 1 – Беломорский, 2 – Канинский, 3 – «Открытая вода», 4 – Индига, 5 – Колгуев Южный, 6 – Колгуев Восточный, 7 – Колгуев Северный, 8 – Печорский, 9 – Варандей, 10 – Медьинский. Остальные альтернативы являются либо промежуточными вариантами из рассмотренных выше, либо подвариантами предложенных.

**Анализ природных условий и экологической ситуации.**  
**Климат.** На формирование климата основное влияние оказывает положение региона за Полярным кругом и макроциркуляцион-

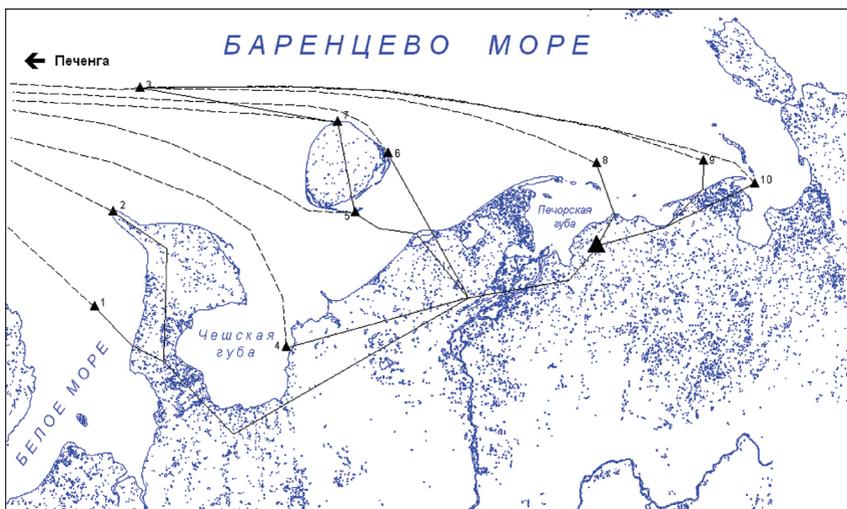


Рис. 13.2. Варианты транспортировки нефти морским путем

ные процессы в Северном полушарии. Как следствие, зима длится полгода, с ноября по апрель; на остальные сезоны приходится по два месяца. Характер атмосферной циркуляции от зимы к лету меняется коренным образом, определяя муссонный тип климата. В осенне-зимний период преобладают ветры южного и юго-западного направления, в весенне-летний – северного и северо-западного. Скорость ветра увеличивается с увеличением широты и достигает 40 м/с. Среднемесячные температуры воздуха колеблются от  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  в феврале до  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  в июле; экстремальные значения изменяются в интервале от  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+34\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Высокоширотное положение региона определяет его избыточное увлажнение. Годовая норма осадков колеблется в пределах 400–500 мм. В среднем за год отмечается от 50 до 85 дней с туманом на морском побережье и 30–40 дней в центральных и южных районах округа. Довольно часты метели: в среднем за год отмечается около 100 дней с метелью на морском побережье и 50–60 дней в более южных районах. Такие атмосферные явления, как грозы и град, отмечаются достаточно редко. В целом климатические условия характеризуются как дискомфортные для проживания населения [Научно-прикладной справочник по климату..., 1989].

**Поверхностные воды.** Избыточное увлажнение, равнинный рельеф и наличие многолетнемерзлых пород, препятствующих дренированию поверхностных вод, определяют изобилие вод на территории НАО. Густая речная сеть, большое количество озер и болот, сложные условия на морской акватории существенно затрудняют освоение этих территорий и способствуют распространению загрязнения. Для водного режима рек характерно высокое весеннее половодье и низкая продолжительная зимняя межень. Глубины рек небольшие и, за исключением некоторых участков, не превышают 2 м. Только в нижнем течении Печоры глубины достигают 15 м. Наибольшие скорости течений – порядка 1 м/с – имеют место на пике весеннего половодья. Морфологические, гидрологические и гидрохимические характеристики озер изменяются в широком диапазоне. Преобладают озера с площадью зеркала 0,2–3 км<sup>2</sup> и средними глубинами 0,5–3 м. Однако у наибольших из них площадь достигает десятков квадратных километров. Наибольшие глубины в озерах, как правило, не превышают 4–5 м, но в отдельных случаях могут достигать 10–15 м. Реки и озера

обычно замерзают в октябре. Толщина льда к концу зимы достигает 0,7–1,2 м, многие мелководные водотоки и водоемы в это время года промерзают до дна. Разрушение ледяного покрова чаще всего происходит в первой половине июня. Заболоченность территории достаточно высока и для некоторых участков, расположенных главным образом на северо-востоке у морского побережья, может достигать 50% и более [Голдина, 1972; Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 3. Северный Край, 1972].

С запада и севера территория НАО омывается водами Белого и юго-востока Баренцева морей, для которых характерны: большая изрезанность береговой черты, наличие многочисленных заливов, проливов, островов и банок; суровые ледовые условия; ярко выраженный приливной характер движения вод; сильные течения; высокая динамика наносов; заметное влияние речного стока на гидрологический режим и динамику вод; относительная бедность видового состава растительного и животного мира [Залогин, Косарев, 1999].

**Геолого-геоморфологические условия.** Рассматриваемая территория располагается в пределах двух орографических областей Русской равнины: Тиманского кряжа и Печорской равнины. Наибольшие отметки высот отмечаются в северной части Тимана, где достигают 300 м. В ландшафтной дифференциации выделяются тундровая и лесотундровая зоны. В тундровой зоне выделены подзоны арктической, типичной северной и южной тундр. В лесотундровой провинции в исследуемый район входит только северная часть. Для этой территории наиболее характерны типично тундровые почвы, представленные своеобразным комплексом поверхностно-глеевых с остаточно-глеевыми (или скрыто-глеевыми) почвами. Многолетнемерзлые породы характерны для всей территории и занимают от 10 до 100% площади. Мощность мерзлых пород увеличивается с запада на восток и с севера на юг, изменяясь от 50 м на полуострове Канин до 400–500 м на южной границе Большеземельской тундры. Сезонное протаивание происходит до глубин 2,6 м. Для морского побережья характерно чередование аккумулятивных, абразионных и термоабразионных берегов. В зависимости от протекания литодинамических процессов на морском дне имеются участки, где преобладает размыв или накопление осадков. Обширные площади относятся к зонам переменных деформаций [Каплин, Леонтьев, Лукьянова, Никифоров, 1991].

**Растительность.** Для растительного покрова характерна выраженная широтная дифференциация. Большую часть площади занимают тундры, переходящие на юге в притундровые редколесья; отдельные участки пойм рек и приморские низменности занимает луговая растительность. Наиболее значительную роль в тундрах играют лишайники и особенно мхи. Формирование растительного покрова приморских лугов происходит в условиях постоянного или периодического влияния соленых морских вод. Приморские луга играют важную роль как олени пастбища в весенне-летний период. В состав редколесий входят представители как таежной, так и тундровой растительности [Атлас Архангельской области, 1976].

**Животный мир** отличается относительно малой численностью и бедностью видового состава. Однако этот район играет исключительно важную роль в функционировании экосистемы всего западного сектора Арктики. Основную массу животных тундры составляют беспозвоночные, на долю которых приходится 90–95% общей зоомассы. Здесь встречаются представители земноводных, пресмыкающихся, птиц, рыб и млекопитающих. Некоторые виды имеют промысловое значение. Здесь обитают редкие виды фауны, включенные в Красные книги Российской Федерации и Международного союза охраны природы (МСОП).

**Уровень загрязнения природной среды.** Эколого-географическое расположение региона определяет достаточно низкий уровень загрязнения всех компонентов природной среды. Такая ситуация, в основном, определяется следующими тремя факторами: слабой развитостью экономики НАО, что определяет достаточно низкий загрязняющий потенциал местного хозяйства, удаленностью региона от крупных источников загрязнения и особенностями природных условий, благоприятствующим рассеиванию и разбавлению загрязняющих веществ до безопасных концентраций.

По данным Росгидромета и МПР России, очагов постоянно высоких загрязнений атмосферного воздуха в НАО не имеется. Концентрации, превышающие предельно допустимый уровень, отличаются кратковременным характером и имеют тенденцию к снижению. Сложнее обстоит ситуация с загрязнением земель. Ввиду отсутствия предприятий по переработке отходов производства и потребления, они до сих пор размещаются на свалках в непосредственной близости

сти от населенных пунктов и давно уже не отвечают природоохраным требованиям и санитарным нормам. Поэтому ежегодно отмечается увеличение объемов не утилизированных отходов.

Нарушение ландшафтов (помимо их загрязнения промышленными и бытовыми отходами) происходит при проведении геологоразведочных работ, в ходе строительства промышленных сооружений и жилья, а также при движении автотранспортных средств вне дорог. Однако величина нарушенных земель невелика и в результате принимаемых мер неуклонно сокращается.

Источниками загрязнения поверхностных вод суши служат сбросы промышленных предприятий, водный транспорт и аварийные разливы нефти на площадях водосбора протекающих по территории НАО рек. Ежегодно в поверхностные водные объекты сбрасывается порядка 1 млн. м<sup>3</sup> сточных вод. Основной сброс осуществляется в реки Печору, в районе Нарьян-Мара, и в ее приток Колву. В целом качество вод на реках и озерах достаточно высокое и только в нижнем течении Печоры воды характеризуется как «загрязненные» и «умеренно загрязненные».

На озерах, куда попадают стоки с буровых площадок, могут отмечаться концентрации загрязняющих веществ до 2–4 ПДК, а иногда и более. По некоторым ингредиентам (фенолы, железо, цинк) фоновые концентрации на отдельных озерах могут превышать предельно допустимые нормы. Это обусловлено естественными причинами: по фенолам – особенностями деструкции водной растительности, для металлов – влиянием стока с сильно заболоченных водосборов.

По большинству показателей морские воды являются чистыми. Некоторое превышение предельно допустимых концентраций временами отмечается для нефтяных углеводородов, остальные ингредиенты, как правило, не превосходят значений, характерных для открытых акваторий Мирового океана.

**Оценка масштабов возможного воздействия.** Уровень воздействия на компоненты природной среды будет принципиально разным при штатных ситуациях во время строительства и эксплуатации объектов нефтетранспортной системы и при возникновении аварийных ситуаций [Губайдуллин, Коробов, 2012].

При штатном режиме эксплуатации, в случае соблюдения всех требований природоохранного законодательства и приме-

нения современных технологий, ущерб природной среде будет незначительным и легко устранимым. В большинстве случаев пространственный масштаб будет локальным. При активизации экзогенных процессов транспортными средствами наибольший ущерб экосистемам будет нанесен вследствие уничтожения почв и растительного покрова. Минимальное воздействие будет оказано на атмосферный воздух и поверхностные воды вследствие благоприятных гидрометеорологических условий, способствующих быстрому снижению концентраций загрязняющих веществ до допустимых норм.

Существенно серьезнее будет ущерб наземным и водным экосистемам в случаях аварийных разливов нефти и пожаров. Крупные аварии могут привести к попаданию в природную среду десятков тысяч тонн загрязняющих веществ. Под угрозой загрязнения окажутся огромные площади. Наиболее ощутимыми будут потери для животного мира. Если катастрофа произойдет в море, то течениями и льдами нефтяные углеводороды могут быть вынесены далеко за пределы региона, а также загрязнить большие участки берегов. Проникновение нефтесодержащих морских вод вглубь материка может привести к загрязнению низовьев рек и связанных с ними болот и озер на расстоянии до 20 км от берега [Арский, Новикова, Потапов, 1996]. Разливы на суше будут иметь не такие тяжелые последствия, поскольку нефть даже на пересеченном рельефе локализуется на относительно небольших участках, но, проникая глубоко в почву и грунт способна оставаться в них десятилетиями, уничтожая растительность и местообитания представителей многих видов фауны [Солнцева, 1998].

**Определение критериев оценки и показателей, характеризующих факторы.** В основу выделения влияющих факторов заложен принцип ограничений [Коробов, 2001]. Ограничивающие факторы определены нами исходя из следующих положений:

- Прямо запрещающие намечаемую деятельность. Устанавливаются законодательным путем.
- Косвенно влияющие на реализацию намечаемой деятельности. Устанавливаются как законодательным путем, так и самими природными условиями.
- Способствующие возникновению аварийных ситуаций и распространению загрязняющих веществ в окружающей среде.

- Увеличивающие стоимость проектирования, строительства и эксплуатации объектов нефтетранспортной системы.

*Тогда под ограничениями можно понимать весь комплекс природных, технико-экономических, социальных и правовых условий, которые в той или иной степени способны отрицательным образом повлиять на проектные решения и сроки проведения работ.* При этом все правовые акты нами рассматриваются в контексте обеспечения безопасности промышленных объектов и транспортных средств и минимизации потенциального ущерба окружающей среде.

**Группировка влияющих факторов.** По характеру влияния природных процессов на объекты транспортной инфраструктуры все ограничивающие факторы можно разделить на группы: экологические, гидрометеорологические, геологические, навигационные и военные. Для полноты к ним также следует добавить технико-экономические факторы, поскольку без них невозможен всесторонний анализ альтернатив нефтетранспортной системы, и социальные, т.к. их учет требуется природоохранным законодательством. В качестве влияющих факторов рассмотрены только те, которые являются: а) запрещающими, б) в наибольшей степени способствующими созданию аварийных ситуаций, в) ведущими к распространению загрязняющих веществ в атмосфере, гидросфере, литосфере и биосфере и г) затрудняющими работу персонала.

Список факторов, критериев и показателей, принятых для решения поставленной задачи, приведен в табл. 13.1.

Таблица 13.1

**Влияющие факторы, критерии оценки факторов и показатели, характеризующие факторы**

№	Фактор	Критерий	Показатель
<b>1</b>	<b>Экологические факторы</b>		
1.1	Особо охраняемые природные территории	Ранг	Среднее расстояние с учетом ранга ООПТ (Р)
1.2	Водоохранные зоны	Ранг	Суммарный ранг пересекаемых водоохранных
1.3	Потенциал загрязнения атмосферы (ПЗА)	Индекс	Величина индекса

*Продолжение табл. 13.1*

№	Фактор	Критерий	Показатель
1.4	Уязвимость морской биоты	Ранг	Средний ранг
1.5	Биопродуктивность территории	Продуктивность фитомассы	Средняя продуктивность тундровой растительности, (ц/га)
1.6	Нефтяные разливы в море	Время достижения ближайших берегов	Средне время достижения ближайших берегов (час)
<b>2</b>	<b>Гидрометеорологические факторы</b>		
2.1	Климатические факторы		
2.1.1	Циркуляция атмосферы	Модуль скорости	Максимальное значение
2.1.2	Термический режим	Температура воздуха	Средняя минимальная температура за год
2.1.3	Туманы	Число дней с туманом за год	Наибольшее число дней с туманом за год
2.1.4	Опасные гидрометеорологические явления	Среднее число дней в году	Сумма дней с опасными гидрометеорологическими явлениями по всем наблюдаемым элементам
2.2	Гидрологические факторы		
2.2.1	Переходы через водотоки	Категория водотока	Количество пересекаемых водотоков
2.2.2	Заболоченность территории	Процент заболоченности	Средний процент заболоченности
2.3	Океанологические факторы		
2.3.1	Циркуляция вод	Модуль скорости суммарных течений	Скорость суммарного течения, возможная 1 раз в 100 лет
2.3.2	Волнение	Средняя высота волны	Средняя высота волны, возможная 1 раз в 50 лет
2.3.3	Уровень	Размах колебаний	Разница между максимальным и минимальным экстремумами, возможными 1 раз в 100 лет

Продолжение табл. 13.1

№	Фактор	Критерий	Показатель
2.3.4	Дрейф льда	Модуль скорости дрейфа	Максимальная скорость дрейфа
2.3.5	Состояние ледяного покрова	Торосистость	Баллы
3	Геологические факторы		
3.1	Сейсмичность	Сейсмический район	Ранг
3.2	Экзогенные процессы	Предрасположенность территории к экзогенным процессам	Количество участков
3.3	Многолетнемерзлые породы	Тип мерзлоты	Протяженность трассы с учетом типа мерзлоты
3.4	Устойчивость морских берегов	Тип берегов	Ранг
3.5	Динамика наносов в море	Устойчивость морского дна к размыву	Ранг
4	Военные факторы		
4.1	Наличие режимных районов	Количество режимных районов	Количество режимных районов
5	Навигационные факторы		
5.1	Наличие ледяного покрова в море	Длительность навигации без применения ледокола	Количество месяцев, когда море свободно ото льда
5.2	Обледенение	Интенсивность	Ранг
5.3	Распределение глубин	Глубина, при которой начинает проявляться снижение мореходности судна	Протяженность трассы, где имеет место влияние глубин (L)
5.4	Наличие опасностей	Полная вероятность прохода опасностей	Оценка вероятности (П)

*Окончание табл. 13.1*

№	Фактор	Критерий	Показатель
6	Технико-экономические факторы		
6.1	Трубопроводные трассы	Длина трубопровода с учетом удельной стоимости	Численное значение (L)
6.2	Объемы транспортируемой нефти	Годовой уровень добычи	Средний годовой уровень (V)
6.3	Танкерный флот	Число линейных танкеров	Среднее число танкеров на трассе (N)
7	Социальные факторы		
7.1	Наличие незанятого населения	Число незанятых	Число незанятых

### **Расчет балльных оценок показателей влияющих факторов.**

Источниками информации характеристик природной среды послужили справочные пособия и научные публикации, а также топографические и навигационные карты, при помощи которых были выполнены необходимые расчеты. В тех случаях, когда имели место разночтения в оценках характеристик природной среды, полученных в результате моделирования или расчетными методами, что имеет место при использовании различных подходов к созданию гидродинамических и стохастических моделей, предпочтение отдавалось наиболее полным из них. Если же по каким-либо причинам это сделать было затруднительно, брались те данные, значения которых были наибольшими.

Типы шкал принимались исходя из характера природных процессов и особенностей используемой информации. Для определенности число интервалов для количественных и переходных шкал принято равным девяти. Соответственно качественные шкалы приводились к такому же количеству интервалов.

Балльные оценки вариантов приведены в табл. 13.2.

**Проведение опроса экспертов.** Весовые коэффициенты рассчитаны на основании опроса 7 экспертов. С учетом исключения результатов, превышающих отношение согласованности, для определения весовых коэффициентов приняты результаты 5 экспертов.

Таблица 13.2

## Ранжирование вариантов по балльным оценкам влияющих факторов

№	Вариант	Влияющие факторы										Сум- ма	Ранг
		Гидрометеорологические				Геоло- логи- чес- кие	Нави- гац- онные	Воен- ные	Тех- нико- эконо- миче- ские	Соци- альные			
		Эко- логи- ческие	Кли- мати- ческие	Гид- рологи- ческие	Океано- графи- ческие								
1	Беломорский	29,1	14,5	8,0	32	40,4	12,1	3	18,5	3,6	161,2	9	
2	Канинский	40,8	13,1	9,7	17,3	42,0	15,4	6	19,8	3,6	167,7	10	
3	Открытая вода	23,1	12,0	2,5	17,1	33,5	3,0	3	16,7	5,9	116,8	2	
4	Индига	28,7	11,5	3,4	26,9	38,0	21,7	3	15,1	5,6	153,9	8	
5	Колгуев Южный	33,3	16,1	1,6	11,0	27,9	19,9	9	13,8	5,9	138,5	6	
6	Колгуев Восточный	34,9	15,5	1,5	7,5	21,7	13,8	3	14,0	5,9	117,8	3	
7	Колгуев Северный	33,5	12,9	2,5	9,9	33,5	14,8	9	15,1	5,9	137,0	5	
8	Печорский	31,6	15,8	2,3	10,4	19,5	18,3	9	11,2	6,0	124,1	4	
9	Варандей	28,9	15,0	2,1	13,2	14,3	19,0	6	8,9	6,0	113,4	1	
10	Медынский	30,7	15,2	7,3	17,1	30,1	31,3	3	9,4	6,0	150,1	7	

**Вычисление весовых коэффициентов.** Межгрупповые и внутригрупповые весовые коэффициенты вычислены методом анализа иерархий. Приведенные их значения в уравнениях (13.2)–(13.9) получены простым усреднением индивидуальных значений экспертов.

### *Экологические факторы*

$$I_1 = 0,197p_{э1} + 0,152p_{э2} + 0,044p_{э3} + 0,127p_{э4} + 0,093p_{э5} + 0,387p_{э6}, \quad (13.2)$$

где в порядке возрастания индексов балльные оценки: особо охраняемых природных территорий, водоохранных зон, потенциала загрязнения атмосферы, уязвимости морской биоты, биопродуктивности территорий и нефтяного загрязнения в море.

### *Гидрометеорологические факторы*

$$I_2 = 0,080p_{гм1} + 0,029p_{гм2} + 0,041p_{гм3} + 0,148p_{гм4} + 0,163p_{гм5} + 0,081p_{гм6} + \\ + 0,072p_{гм7} + 0,133p_{гм8} + 0,043p_{гм9} + 0,093p_{гм10} + 0,117p_{гм11}, \quad (13.3)$$

где в порядке возрастания индексов балльные оценки: ветра, минимальной температуры воздуха, туманов, опасных гидрометеорологических явлений, переходов через водотоки, заболоченности территории, течений, волн, уровней, дрейфа льда и торосистости.

### *Геологические факторы*

$$I_3 = 0,163p_{г1} + 0,219p_{г2} + 0,263p_{г3} + 0,202p_{г4} + 0,153p_{г5}, \quad (13.4)$$

где в порядке возрастания индексов балльные оценки: сейсмичности, экзогенных геологических процессов, состояния многолетнемерзлых пород, устойчивости морских берегов и динамики наносов.

### *Военные факторы*

$$I_4 = p_v, \quad (13.5)$$

где весовой коэффициент, ввиду единственности фактора, равен единице.

### *Навигационные факторы*

$$I_5 = 0,301p_{н1} + 0,275p_{н2} + 0,205p_{н3} + 0,219p_{н4}, \quad (13.6)$$

где в порядке возрастания индексов балльные оценки: наличия ледяного покрова, обледенения, распределения глубин и наличия опасностей.

**Технико-экономические факторы**

$$I_6 = 0,323p_{т31} + 0,188p_{т32} + 0,489p_{т33}, \quad (13.7)$$

где в порядке возрастания индексов балльные оценки: трубопроводных трасс, объемов транспортируемой нефти и танкерного флота.

**Социальные факторы**

$$I_7 = p_c, \quad (13.8)$$

где весовой коэффициент, ввиду единственности фактора, равен единице.

С учетом весовых коэффициенты групп факторов итоговое выражение для расчета суммарных оценок альтернатив имеет следующий вид:

$$I = 0,151 I_1 + 0,136 I_2 + 0,149 I_3 + 0,188 I_4 + 0,093 I_5 + \\ + 0,207 I_6 + 0,076 I_7. \quad (13.9)$$

По мнению экспертов, наиболее значимы технико-экономические факторы. На второе место эксперты поставили военные факторы, затем в порядке убывания – экологические, геологические, гидрометеорологические, навигационные и социальные.

В случае разбиения факторов на группы их количество в каждой группе может не совпадать, что имеет место и в данном случае. Это приводит к деформации коэффициентов, поскольку чем больше факторов, тем заведомо меньше доля единицы, приходящаяся на каждый из них, и наоборот. Чтобы сравнение факторов было корректным, весовые коэффициенты необходимо привести к единому масштабу, что достигается путем введения мультипликативного множителя, на который необходимо умножить соответствующие коэффициенты в формулах (13.2)–(13.9):

$$m_j = \frac{Rn_{ij}}{N}, \quad (13.10)$$

где  $m_j$  – масштабный множитель,  $n_{ij}$  – количество влияющих факторов в группе,  $N$  – общее количество факторов,  $R$  – число групп. Число групп  $R$  необходимо для выполнения условия равенства суммы всех весовых коэффициентов единице.

Однако, если принять во внимание приведенные внутригрупповые коэффициенты, наиболее значимыми факторами оказались (рис. 13.3): аварийные разливы нефти в море, количество линейных танкеров, обеспечивающих транспортировку нефти от терминалов до порта перегрузки, переходы через водотоки, опасные гидрометеорологические явления, протяженность трубопроводных трасс, волнение, наличие режимных районов и особо охраняемых природных территорий. Наименее значимыми оказались потенциал загрязнения атмосферы, температура воздуха, туманы и колебания уровня моря.

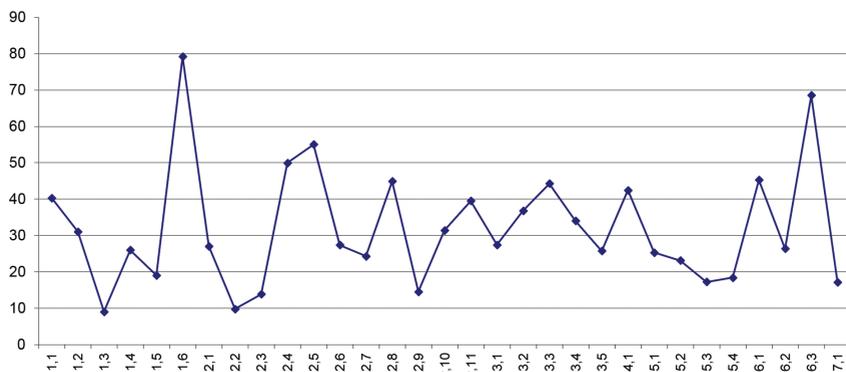


Рис. 13.3. Приведенные весовые коэффициенты влияющих факторов. Цифры на оси ординат соответствуют положению факторов в уравнениях (13.3)–(13.9)

### Расчет балльных оценок показателей факторов с учетом их весовых коэффициентов.

Балльные оценки альтернатив рассчитаны по формуле (13.1). Для удобства анализа приведенные в табл. 13.3 значения суммарных оценок умножены на 100. Наиболее предпочтительными для реализации являются варианты «Открытая вода» и «Варандей». Несколько уступает им вариант «Печорский». Остальные альтернативы могут быть исключены из дальнейшего рассмотрения.

Таким образом, проведенный методом анализа иерархий анализ создания нефтяной транспортной инфраструктуры для вывоза нефти за пределы северной части Тимано-Печорской провинции,

Таблица 13.3  
**Ранжирование вариантов по балльным оценкам с учетом весовых коэффициентов  
 влияющих факторов**

№	Вариант	Влияющие факторы										Сум- ма	Ранг
		Эко- логи- ческие	Гидрометеорологические			Гео- логи- чес- кие	Нави- гаци- онные	Воен- ные	Тех- нико- эконо- миче- ские	Соци- альные			
			Кли- мати- ческие	Гид- рологи- ческие	Океано- графи- ческие								
1	Беломорский	81,7	13,3	16,7	34,7	121,0	29,9	6	105,5	2,7	411,5	9	
2	Канинский	118,0	11,9	20,6	19,8	126,9	36,6	11	113,6	2,7	461,1	10	
3	Открытая вода	50,7	8,4	5,0	27,6	101,3	7,8	6	95,5	4,5	306,8	1	
4	Индига	85,1	9,1	7,0	29,5	111,6	51,2	6	85,2	4,5	389,2	8	
5	Колгуев Южный	104,3	12,3	3,0	14,7	80,1	47,8	17	79,1	4,5	362,8	5	
6	Колгуев Восточный	106,9	10,8	2,8	11,8	65,5	36,2	6	80,5	4,5	325,0	4	
7	Колгуев Северный	104,0	8,9	5,0	14,4	101,3	38,3	17	87,2	4,5	380,6	7	
8	Печорский	93,0	11,2	2,5	15,7	54,2	48,1	17	70,3	4,6	317,4	3	
9	Варандей	88,1	9,7	2,8	17,8	39,3	50,5	11	87,2	4,6	311,0	2	
10	Медынский	98,6	9,8	8,7	20,4	87,7	74,8	6	56,8	4,6	367,4	6	

выполненный с учетом требований для ранних стадий проектирования сложных проектов, показал, что дальнейшие исследования могут быть ограничены всего тремя альтернативами.

Эти результаты были получены в 2004 году в рамках диссертационной работы одного из авторов [Коробов, 2004], в которой использовалась исключительно информация общего доступа, опубликованная в открытой печати – справочниках, атласах, монографиях и других научных публикациях. И этого оказалось достаточно, чтобы при помощи экспертно-аналитической модели классификации альтернатив обосновать наиболее перспективные варианты выбора размещения нефтяного отгрузочного терминала. Подтверждение тому – строительство в 2008 году терминала у острова Варандей в юго-восточной части Баренцева моря. Эта альтернатива оказалась второй в списке, лишь немного уступив варианту «Открытая вода», да и то лишь потому, что не учитывались сроки строительства терминала и трубопроводов и стоимость перекачки нефти. По результатам проведенных оценок в полном объеме, включая инженерные изыскания, было отдано предпочтение именно Варандею, что не противоречит нашим результатам, поскольку нами решалась не проектная задача, а задача выбора.

## Глава 14

### **Моделирование размещения трасс трубопроводов в прибрежной зоне**

Экспертно-аналитические технологии могут быть успешно использованы и при решении, если так можно выразиться, сопредельных задач, к которым относятся трубопроводы и другие объекты нефтяной транспортной инфраструктуры, по которым нефть доставляется на морские терминалы. В предыдущей главе мы убедились, что имеет место некая последовательность при принятии решений выбора места размещения объекта. Рассмотрим эту сторону вопроса подробнее [Коробов, Тутыгин, Чижова, 2018].

Транспортная инфраструктура является основой освоения минерально-сырьевых ресурсов и обеспечения национальной безопасности в Арктике. Крупные проекты, требующие для своей реализации многие миллиарды рублей, рассматриваются после-

довательно на альтернативной основе. Такая практика сложилась, чтобы свести к минимуму – насколько это возможно – ошибки и выбрать наиболее экономически эффективный и экологически безопасный вариант [Кочуров, 2001].

Нефтяная транспортная инфраструктура как раз относится к таким проектам без всяких оговорок. Большая вариативность размещения объектов инфраструктуры и прокладки трасс, как мы видели выше, длительные сроки отдачи от вложения инвестиций, а в Арктике ещё и сложные природные условия, оказывающие серьёзное влияние на многие аспекты выбора, делают этот процесс многоэтапным.

Этапность в принятии решений необходима ещё и потому, что на принятие решений влияет множество факторов, информация о некоторых на стадии прединвестиционного процесса и ранних стадиях проектирования может быть не полной, а для части факторов и недоступной. Весь вопрос заключается в том, какими должны быть эти модели на разных стадиях процесса принятия решений. Представляется целесообразным последовательное наращивание сложности модели по мере роста информационного обеспечения и стадии прединвестиционного и инвестиционного процессов [Коробов, 2004].

**Анализ возникающих проблем.** Однозначные рекомендации относительно моделей дать сложно из-за отсутствия чётких критериев к информации, объём и качество которой будет достаточным для уверенного принятия решения в пользу той или иной альтернативы. Это зависит от нескольких обстоятельств объективного и субъективного характера.

**Проблема 1:** насколько численная оценка альтернативы должна превосходить конкурентов, чтобы быть безоговорочной?

Все модели позволяют так или иначе оценить альтернативы численно. Самое простое решение состоит в выборе наибольшей или, если оценивание производится на принципах минимизации, наименьшей оценок. Минимальные значения при обычном оценивании также могут использоваться для исключения явных аутсайдеров, что позволяет экономить ресурсы на последующих стадиях рассмотрения альтернатив. Но это не столь актуально, как проблема выбора лидера. Кроме того, при изменении модели некоторые альтернативы могут статус аутсайдера потерять.

Решить, весьма приближённо, эту проблему можно двумя способами: формальным и экспертным. Формальный подход основывается на использовании шкалы, например, хорошо известной шкалы Харрингтона [Harrington, 1965], оцифрованной соответствующим образом. Тогда если лидер попадает в первую градацию, а остальные в другие, то его можно принять за безусловно-го. Правда, при применении шкал может оказаться, что различия между интегральными показателями невелико, а они оказываются в разных градациях, что снижает эффективность применения шкал для классификации объектов.

Другой путь состоит в определении минимальной разницы между первой и последующей альтернативами, выраженной в процентах, экспертным путём. Усреднённая экспертная оценка и станет таким критерием. Нам этот подход представляется более эффективным, в том числе и потому, что он свободен от недостатка, органически присущему предыдущему подходу.

**Проблема 2:** какая должна быть область неопределённости между численно и экспертно оцениваемыми факторами, чтобы лица, принимающие решения, могли делать это уверенно? На первых этапах оценивания, когда используются относительно простые модели, не все показатели влияющих факторов могут быть получены в численном виде, а оцениваются только экспертно. Этот процесс носит объективный характер и делает неравноценным сравнение факторов. Соотношение между этими двумя группами факторов может быть весьма значительным и по предварительным оценкам авторов достигать 30–60%. Это приводит к неуверенности у лиц, принимающих решения, к выбору альтернативы, т.к. на последующих этапах более строгие и обусловленные оценки факторов могут кардинально изменить ситуацию.

Какой должна быть величина этой неопределённости, должны решать сами менеджеры, усреднённые мнения которых могут быть приняты в качестве минимально необходимого порога. В случае превышения установленного такой процедурой порога формализация объекта должна быть пересмотрена.

**Проблема 3:** какой сложности должны быть модели, чтобы соответствовать уровню принятия решения? С точки зрения системного подхода к моделированию, ответ на этот вопрос в определенной мере дает фундаментальная теорема У.Р. Эшби, известная еще

как закон необходимого разнообразия [Ashby, 1957]. Суть его заключается в том, что для создания системы, способной справиться с решением проблемы, обладающей определенным разнообразием (сложностью), необходимо, чтобы сама система имела еще большее разнообразие, чем решаемая проблема, или была способна создать в себе это разнообразие [Острейковский, 1997].

Этапы содержат в себе модели, позволяющие последовательно наращивать их сложность и обладающие свойством производить оценку по некоторому ясно интерпретируемому интегральному показателю. В соответствии с этими требованиями оценка альтернатив может проводиться в такой последовательности.

**Этап 1. Простое ранжирование альтернатив.** Эксперты – для простоты всех лиц, принимающих участие в оценивании, будем называть экспертами – располагают альтернативы по мере их значимости. Если эксперт полагает, что две или более альтернативы равны, что допускается, то их рангом будет средняя величина [Химмельблау, 1973]. Например, если вторая и третья альтернативы принимаются равнозначными, то их рейтинг у данного эксперта будет равным  $(2 + 3) / 2 = 2,5$ , а если вторая, третья и четвертая, то  $(2 + 3 + 4) / 3 = 3$ . Все оценки экспертов усредняются, и по ним проводится окончательное ранжирование.

**Этап 2. Ранжирование факторов и ранжирование альтернатив.** Факторы принимаются неравными и также ранжируются по их значимости. Расчёты суммарного показателя проводятся по формуле

$$R_j = \sum_{i,j=1}^N l_i r_{ij}, \quad (14.1)$$

где  $R$  – суммарная оценка ранга альтернативы, а  $r_{ij}$  – ранг  $i$ -го фактора  $j$ -й альтернативы,  $l_i$  – ранги факторов.

**Этап 3. Присвоение влияющим факторам весовых коэффициентов и ранжирование альтернатив.** Весовые коэффициенты более точные оценки значимости факторов. Их можно получить, как мы неоднократно отмечали, различными способами путём экспертных опросов. Отметим только, что перерасчёт рангов в весовые коэффициенты – а это вполне возможно, если каждый ранг разделить на их сумму, – ничего в данном случае не даёт, по-

скольку будет являться простым линейным преобразованием. Линейные же преобразования шкал для сравнительных оценок равноценны умножению интегральных оценок на некую константу, вследствие чего иерархия альтернатив остаётся прежней.

Тогда расчёты проводятся по формуле

$$R_j = \sum_{i,j=1}^N k_i r_{ij}, \quad (14.2)$$

где  $R$  – суммарная оценка ранга альтернативы, а  $r_{ij}$  – ранг  $i$ -го фактора  $j$ -й альтернативы,  $k_i$  – весовые коэффициенты факторов.

**Эман 4.** *Расчёт показателей влияющих факторов и приведение показателей к единому масштабу.* При ранжировании альтернатив каждый показатель сравнивается экспертами по его значимости. При этом нет необходимости, чтобы абсолютно все показатели были сопоставимы. Так, показатель «длина трубопровода» легко поддаётся сравнению, а вот «экологическая ситуация» – только экспертным путём, исходя из принципа: чем хуже ситуация, тем больше затрат потребуется на природоохранные мероприятия. Как видно из этого примера, эти два показателя в натуральном выражении несопоставимы. Это приводит к неопределённости при принятии решения, поскольку при сравнимых оценках стоимость тех же природоохранных мероприятий для некоторой альтернативы может существенно повысить стоимость всего проекта по данному варианту и тем самым кардинально повлиять на интегральный показатель. Поэтому требуется привести их к сопоставимым величинам – натуральным или безразмерным, например, балльным оценкам. Расчёт интегрального показателя можно производить по формуле (14.2), заменив в ней ранги на балльные оценки.

**Эман 5.** *Увеличение количества влияющих факторов.* Один и тот же объект можно описать различным количеством характеристик. На первых этапах исследования число учитываемых факторов и, соответственно, показателей, стремятся свести к минимуму, выбирая наиболее важные из них. При этом часто, хотя и не всегда, производят агрегирование показателей.

Но на заключительных этапах проблему необходимо исследовать всесторонне, что требует рассмотрения большего числа

влияющих факторов. При большом их количестве факторы целесообразно разбивать на группы: экономические, экологические, технические и т.д.

Тогда расчётная формула для интегрального показателя примет вид:

$$R_j = \sum k_l \sum_{i,j=1}^N k_i r_{ij}, \quad (14.3)$$

где  $k_j$  – весовые коэффициенты групп,  $l$  – число групп.

Если число факторов становится слишком большим – порядка сотни и более, группы также можно объединять, рассчитывая для них свои весовые коэффициенты. Тогда в расчётной формуле появиться ещё одна, и более, сумма. Однако этого следует избегать, поскольку каждый новый уровень сопровождается метапереходами в состоянии системы, что накладывает необходимость в исследовании дополнительных связей между уровнями [Турчин, 2000].

**Этап 6.** *Применение сетей для уточнения весовых коэффициентов влияющих факторов.* В последние годы быстрыми темпами развиваются сетевые технологии, позволяющие более точно учесть все виды связей между компонентами сложных систем. Наиболее известные из сетей нейронные и аналитические, которые дают возможность сделать перерасчёт весовых коэффициентов. Это, как правило, приводит к принципиальному изменению значений интегрального показателя при балльных классификациях, используемых нами в решении данной задачи.

**Этап 7.** *Использование более сложных показателей.* Использование большего числа данных и информации вызывает необходимость пересмотра показателей влияющих факторов с целью сделать их более адекватными исследуемому объекту. Достигается это как уточнением уже принятых показателей, так и введением новых.

Под уточнением понимается: а) использование новых выборок; б) удлинение рядов; в) добавление большего количества характеристик (например, при расчёте представляющих собой сумму некоторых величин индексов).

Новые показатели имеют другую природу по отношению к старым. Так, натуральные показатели заменяются показателями в

денежном выражении, которые далеко не всегда коррелированы. Абсолютные показатели могут заменяться удельными, которые в большинстве случаев более эффективны, особенно в задачах, где социальный блок имеет большую важность.

Показатель – формально – может оказаться прежним, но его расчёт меняется кардинальным образом. Для расчёта многих показателей используются модели различной сложности. На начальных стадиях нет смысла чрезмерно усложнять задачу, поэтому стараются выбрать модели попроще. (Простые модели совсем не означает, что они хуже сложных. Просто сложные модели обладают большими возможностями, и их использование может иметь место и в других случаях, например, непосредственно при проектировании объектов, таких как гидротехнические сооружения, где используются климатические и океанологические характеристики, являющиеся показателями природных факторов в задаче выбора альтернативы.)

Расчётные формулы (14.2) и (14.3) при замене показателей не меняются, но балльные оценки новых показателей могут измениться заметно.

**Виртуальный пример.** Рассмотрим предложенный подход на виртуальном примере. Учитывая сильную изрезанность береговой черты, наличие большого количества отмелей и островов, значительную пространственно-временную изменчивость характеристик гидрометеорологических факторов и существенные экологические ограничения, место расположения порта (портопункта) может заметно варьировать даже на относительно небольших участках побережья, относящихся к одному гидрографическому району.

Рассмотрим три альтернативы возможного размещения порта (рис. 14.1). Пусть каждая имеет свою особенность: у варианта А – жилой посёлок и крупный остров, влияющий на гидрометеорологические характеристики акватории; у варианта В – объект Министерства обороны; восточнее варианта С – национальный парк федерального значения.

Для начального оценивания выберем следующие факторы: гидрометеорологические условия, экологическая ситуация, инфраструктура, близость населённых пунктов, инвестиционная привлекательность [Матвиенко, Тутыгин, Чижова, 2012] и проведём

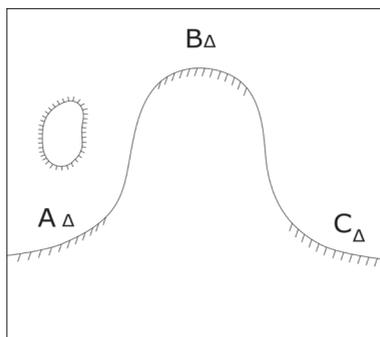


Рис. 14.1. Схема возможного расположения порта

их ранжирование. Расчёты суммарных рангов выполнены по формулам (14.1)–(14.2) и представлены в табл. 14.1–14.7.

На первом этапе ранжирование проведено по принципу: «чем лучше условия, тем выше ранг». По результатам простого ранжирования бесспорный лидер – первый вариант (табл. 14.1).

Таблица 14.1

**Этап 1. Ранжирование альтернатив**

Факторы		Альтернативы		
		А	В	С
1	гидрометеорологические условия	1	2	3
2	экологическая ситуация	2,5	2,5	1
3	инфраструктура	3	2	1
4	близость населенных пунктов	3	1,5	1,5
5	инвестиционная привлекательность	3	1	2
Сумма рангов		12,5	9,5	8,5
Место		1	2	3

Ранжирование факторов проведено по принципу: «чем больше значимость, тем выше ранг». Итоговый результат не изменился, но отрыв лидера – альтернатива А – от конкурентов стал более значимым: с 24% и 32% до 39% и 53% соответственно (табл. 14.2).

Таблица 14.2

**Этап 2. Ранжирование факторов и альтернатив**

Факторы		Ранги факторов	Альтернативы		
			А	В	С
1	гидрометеорологические условия	1	1	2	3
2	экологическая ситуация	2	2,5	2,5	1
3	инфраструктура	5	3	2	1
4	близость населенных пунктов	3	3	1,5	1,5
5	инвестиционная привлекательность	4	3	1	2
Сумма			42	25,5	22,5
Место			1	2	3

Использование весовых коэффициентов, найденных авторами прямой расстановкой, привело к изменению порядка суммарных рангов альтернатив: второй и третий вариант поменялись местами. Бесспорным лидером осталась первая альтернатива (табл. 14.3).

Таблица 14.3

**Этап 3. Присвоение влияющим факторам весовых коэффициентов и ранжирование альтернатив**

Факторы		Весовые коэффициенты	Альтернативы		
			А	В	С
1	гидрометеорологические условия	0,05	1	2	3
2	экологическая ситуация	0,10	2,5	2,5	1
3	инфраструктура	0,15	3	2	1
4	близость населенных пунктов	0,31	3	1,5	1,5
5	инвестиционная привлекательность	0,39	3	1	2
Сумма			2,85	1,50	1,64
Место			1	3	2

Замена рангов показателей на их балльные оценки, рассчитанные по 10-балльным линейным шкалам, вернула ранжирование альтернатив к исходному порядку (табл. 14.4). При этом преимущество первой альтернативы над конкурентными увеличилось примерно в два раза.

Таблица 14.4

**Этап 4. Балльные оценки показателей и весовые коэффициенты альтернатив**

Факторы		Весовые коэффициенты	Альтернативы		
			А	В	С
1	гидрометеорологические условия	0,05	5	6	9
2	экологическая ситуация	0,10	5	7	3
3	инфраструктура	0,15	9	5	3
4	близость населенных пунктов	0,31	9	6	4
5	инвестиционная привлекательность	0,39	10	2	3
Сумма			8,79	4,39	3,61
Место			1	2	3

Увеличение числа влияющих факторов с последующим пересчётом весовых коэффициентов оставило порядок альтернатив прежним, но разница между ними, особенно между первой и второй, заметно сократилась (табл. 14.5).

Таблица 14.5

**Этап 5. Увеличение количества влияющих факторов и пересчёт весовых коэффициентов**

Факторы		Весовые коэффициенты	Альтернативы		
			А	В	С
1	климат	0,04	5	6	9
2	океанологические условия	0,05	5	8	6
3	экологическая ситуация	0,08	5	7	3
4	инфраструктура	0,13	9	6	3
5	близость населенных пунктов	0,17	9	6	4
6	инвестиционная привлекательность	0,21	10	4	3
7	интересы национальной безопасности	0,20	6	10	5
8	коренные малочисленные народы Севера	0,12	6	8	3
Сумма			7,57	6,80	3,98
Место			1	2	3

Перерасчёт весовых коэффициентов путём аналитической сети – сами построения мы приводить не будем – ещё более сблизил первую и вторую альтернативы, но порядок мест остался прежним (табл. 14.6).

Таблица 14.6

**Этап 6. Применение сетей для уточнения весовых коэффициентов влияющих факторов**

Факторы		Весовые коэффициенты	Альтернативы		
			А	В	С
1	климат	0,08	5	6	9
2	океанологические условия	0,08	5	8	6
3	экологическая ситуация	0,11	5	7	3
4	инфраструктура	0,12	9	6	3
5	близость населенных пунктов	0,16	9	6	4
6	инвестиционная привлекательность	0,18	10	4	3
7	интересы национальной безопасности	0,18	6	10	5
8	коренные малочисленные народы Севера	0,09	6	8	3
Сумма			7,29	6,57	4,24
Место			1	2	3

Уточнение показателей влияющих факторов за счёт привлечения дополнительной информации привело к тому, что первая и вторая альтернативы поменялись местами (табл. 14.7). Различие между ними невелико, но выбор между ними сделать непросто.

Рассмотрим, как изменялись места альтернатив от этапа к этапу (табл. 14.8). Мы видим, что изменение ранжирования происходило не на всех этапах – всё же географически варианты размещения объекта транспортной инфраструктуры достаточно близки, но сближение и расхождение интегрального показателя имело место постоянно. На последних этапах это привело к тому, что основные альтернативы поменялись местами.

Отметим, что подход, основанный на поэтапном анализе объекта, прочно вошёл в практику. Для сложных, нечётко формализуемых объектов последовательный анализ может достигать 14 шагов [Колоденкова, 2016].

Таблица 14.7

**Этап 7. Применение более сложных показателей  
влияющих факторов**

Факторы		Весовые коэффициенты	Альтернативы		
			А	В	С
1	климат	0,08	4	7	9
2	океанологические условия	0,08	4	8	6
3	экологическая ситуация	0,11	4	8	3
4	инфраструктура	0,12	9	7	3
5	близость населенных пунктов	0,16	9	6	4
6	инвестиционная привлекательность	0,18	9	5	3
7	интересы национальной безопасности	0,18	7	10	6
8	коренные малочисленные народы Севера	0,09	5	8	4
Сумма			6,93	7,06	4,51
Место			2	1	3

Таблица 14.8

**Ранжирование альтернатив по этапам**

Этапы	Альтернативы		
	А	В	С
1	1	2	3
2	1	2	3
3	1	3	2
4	1	2	3
5	1	2	3
6	1	2	3
7	2	1	3

На основании полученных результатов, пусть и на виртуальном, но достаточно приближенном к реальной действительности примере, рассмотрим, какие возникают при этом проблемы.

*Критерий выделения бесспорного лидера.* Учитывая неопределённость, возникающую в отсутствии чёткого и однозначного

критерия бесспорного превосходства альтернативы-лидера над конкурентами, однозначно выработать такой критерий будет чрезвычайно сложно. Эта проблема, которую можно определить, как установление границ между классами, носит общеметодологический характер и не имеет чёткого решения. Как мы могли убедиться, даже почти двойное превосходство ещё не является гарантией окончательного лидерства одной альтернативы.

*Сколько требуется этапов?* Одним из ключевых вопросов состоит в том, стоит ли продолжать усложнение модели, если лидирующая альтернатива определена согласно принятому критерию – его можно установить формально, что часто и делается на практике.

Если численные оценки двух и более альтернатив будут находиться в пределах одного оцениваемого интервала, то окончательное решение может быть принято с использованием процедур голосования.

Таким образом, предложенный подход к последовательному принятию стратегических решений в задачах проектирования транспортной инфраструктуры в Арктике позволяет свести к минимуму возможные ошибки и выбрать наиболее экономически эффективный и экологически безопасный вариант реализации соответствующего проекта.

Теперь рассмотрим реальный пример [Тутыгин, Коробов, Губайдуллин, Чижова, 2018]. Построим общую модель системы следующим образом. В пространстве факторов  $R^{n_1} \times R^{n_2} \times \dots \times R^{n_s}$  введём вектор-факторы  $F_j = (f_{j1}, f_{j2}, \dots, f_{jn_j}) \in R^{n_j}$ . В первой свертке

$\Phi: R^{n_1} \times R^{n_2} \times \dots \times R^{n_s} \rightarrow \mathbb{R}_+^s$ , где  $\Phi_j: F_j \rightarrow \sum_{i=1}^{n_j} k_{ji} f_{ji} = y_j$ , а коэффици-

енты  $k_{pi}$  определяются внутри каждой группы, описываемой со-

ответствующим вектор-фактором,  $p = \overline{1, s}$ . При этом  $\sum_{i=1}^n k_{1i} = 1$ ,

$$\sum_{i=1}^m k_{2i} = 1, \dots, \sum_{i=1}^l k_{si} = 1. ,$$

Отображение  $\Psi: \mathbb{R}_+^s \rightarrow \mathbb{R}_+$  задает вторую свёртку:

$$(y_1, y_2, \dots, y_s) \rightarrow \sum_{j=1}^s w_j y_j, \quad \sum_{j=1}^s w_j = 1.$$

$$\left\{ \begin{array}{cccc} \underbrace{N=1;}_1 & \underbrace{N=2;}_2 & \dots & \underbrace{N=s}_s \\ n_1 & n_2 & \dots & n_s \\ k_{1i} & k_{2i} & \dots & k_{si} \\ y_1 & y_2 & \dots & y_s \\ w_1 & w_2 & \dots & w_s \end{array} \right\}$$



$$Y = \sum_{j=1}^s w_j y_j$$

Этот случай был «идеальным» в том смысле, что все вектор-факторы полностью и однозначно определены. Однако в реальной жизни далеко не всегда показатели вектор-факторов известны или известны с необходимой точностью. Кроме того, могут быть и скрытые факторы, выявление которых мы сейчас рассматривать не будем, чтобы чрезмерно не усложнять задачу.

Рассмотрим случай с наличием «неопределённых» факторов (скрытые факторы отнесём к этой категории). Переформируем строку, содержащую  $\sum_{j=1}^s n_j$  компонент, из  $R^{n_1} \times R^{n_2} \times \dots \times R^{n_s}$  в вектор размерности  $q + 1$  следующим образом. Соберем все «определённые» значения в первые  $q$  позиций, а последнюю координату зарезервируем под «неопределённость»:

$$\left( \begin{array}{c} \underbrace{z_1, z_2, \dots, z_q}, \\ \text{числовые значения} \quad \text{зона неопределенности} \end{array} \right), \quad z_0$$

где  $z_1, z_2, \dots, z_q$  – числа из  $\mathbb{R}_+$ ;  $z_0$  – нечёткое число (по Л. Заде [2]).

Введём весовые коэффициенты  $v_1$  и  $v_0$ , где  $v_1$  – доля «определённости» и  $v_0$  – доля «неопределённости»,  $v_1 + v_0 = 1$ ;  $v_1, v_0 \geq 0$ .

Тогда  $Z = \sum_{j=1}^q z_j x_j$ , где:  $x_j$  – весовые коэффициенты в зоне «опре-

делённости»  $\sum_{j=1}^q x_j = 1$ ,  $x_j > 0$ . Итоговый показатель имеет вид

$Q = v_1 Z + v_0 z_0$ , в котором составляющая  $v_0 z_0$  – нечёткое число. Пусть  $\mu$  – функция принадлежности нечёткого множества, при этом  $z_0 = \mu(\beta)$ , где  $\beta (\gamma, \delta)$ . Тогда оценку  $Q = v_1 Z + v_0 \mu(\beta)$  можно заменить на  $Q' = v_1 Z + v_0 \varepsilon$ , где  $v_1 Z$  – число, а  $\varepsilon$  – некоторая численная оценка для соответствующего нечёткого множества  $A$ . Следуя подходу, предложенному А.И. Орловым [Орлов, 2009], в качестве такой оценки может быть выбрано, например, среднее значение нечёткого множества  $A$ , которое рассчитывается как

$$\varepsilon(A) = \frac{\sum_{i=1}^N a_i \mu(a_i)}{\sum_{i=1}^N \mu(a_i)}, \text{ где } a_i \text{ – произвольное нечёткое множество,}$$

в данном случае – это интервал, определяемый экспертным путём.

Для реализации модели нужно оценить соразмерность главной части  $v_1 Z$  и  $\varepsilon$ . Покажем, как это можно сделать на конкретной задаче. В качестве примера возьмём проблему выбора альтернативы строительства нефтегазовой транспортной инфраструктуры для доставки углеводородов из Коротаихинской впадины до отгрузочного терминала. Попутно отметим, что проблема несбалансированности показателей характерна также и для других экономических проблем в АЗРФ [Павленко, Меламед, Куценко, Тутыгин, Авдеев, Чижова, 2017].

На северо-востоке Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции в пределах Коротаихинской впадины имеется существенный резерв наращивания разведанной сырьевой базы углеводородов [Сарычев, Цыбин, Губайдуллин, 2016]. Он связан с вовлечением в освоение не востребуемых перспективных нефтегазовых объектов зонального и локального уровня.

Схема возможных альтернативных вариантов вывоза углеводородных ресурсов из Коротаихинской впадины приведена на

рис. 14.2. Южное направление (вариант 1) в сторону Усинска и северное направление до Варандейского терминала (вариант 2) предполагают трубопроводный транспорт нефти. Вариант 3 до Индиги следует рассматривать главным образом для вывоза природного газа.



Рис. 14.2. Схема альтернатив транспортировки нефтяных углеводородов из Кортаихинской впадины

Решать в первом приближении проблему выбора наиболее перспективной альтернативы будем посредством ранжирования факторов с учётом их весовых коэффициентов. В этой задаче факторы разбиты на группы, часть из которых можно оценить достаточно точно – экономические факторы. Другая часть – природно-экологические – точному расчёту поддаётся с трудом.

В качестве интегрального показателя альтернативы выбраны ранговые оценки факторов с учётом их значимости. Расчёты про-

водятся по не раз уже используемой нами формуле  $R = \sum_{i,j=1}^N k_i r_{ij}$ , где

$R$  – суммарная оценка ранга альтернативы, а  $r_{ij}$  – ранг  $i$ -го фактора  $j$ -й альтернативы,  $k_i$  – весовые коэффициенты факторов.

Обоснование факторов и расчёт их весовых коэффициентов методом анализа иерархий уже подвергался исследованию [Губайдуллин, Коробов, Сарычев, 2017; Губайдуллин, Коробов, Сарычев, 2017; Юдахин, Губайдуллин, Коробов, 2002.]. Ранжирование фак-

торов по каждой альтернативе выполнено экспертным путём по принципу: чем хуже условия, тем выше ранг. При равенстве оценок ранги усреднялись. Исходные данные и результаты расчётов приведены в табл. 14.9.

Таблица 14.9

**Ранговое ранжирование альтернатив  
(принцип ранжирования – чем хуже условия, тем выше ранг)**

№	Факторы	ВК	Альтернативы		
			1	2	3
	<i>Экологические</i>	<b>9,5</b>			
1	Особо охраняемые природные территории	3,88	1	2	3
2	Водоохранные зоны водотоков и водоемов	2,21	2	1	3
3	Зоны повышенной биопродуктивности	2,18	3	1,5	1,5
4	Степень загрязненности природной среды	1,02	1	2	3
	<i>Климатические</i>	<b>5,4</b>			
5	Ветровой режим	0,89	1	3	2
6	Температурный режим	1,14	1	3	2
7	Режим осадков	0,99	1	3	2
8	Опасные гидрометеорологические явления	2,26	1	3	2
	<i>Гидрологические</i>	<b>9,0</b>			
9	Заболоченность территории	3,48	1	3	2
10	Переходы через водотоки и водоемы	2,70	2	1	3
11	Уровненный режим	1,10	1	3	2
12	Ледовый режим	1,52	2	3	1
	<i>Физико-географические и геологические</i>	<b>10,6</b>			
13	Рельеф	2,28	3	1	2
14	Почвенные условия и грунты	1,50	1	3	2
15	Ресурсный потенциал	3,97	3	2	1
16	Криогенные процессы	2,83	1	3	2
17	Экзогенные процессы	2,68	1	3	2
18	Сейсмичность	2,30	2,5	1	2,5

Окончание табл. 14.9

№	Факторы	БК	Альтернативы		
			1	2	3
	<b>Капитальные затраты</b>	<b>17,9</b>			
19	Стоимость оборудования	6,57	1	3	2
20	Стоимость строительно-монтажных работ и услуг	5,81	1	3	2
21	Пошлины на импортное оборудование	2,91	1	3	2
22	Стоимость кредитных ресурсов	3,82	2,5	2,5	1
23	Получение доступа к источникам сырья	2,73	1	3	2
	<b>Текущие затраты</b>	<b>17,9</b>			
24	Тарифы на электроэнергию для транспортировки	2,84	1	3	2
25	Стоимость фрахта	5,34	1	3	2
26	Стоимость услуг магистрального трубопровода	5,51	1	3	2
27	Размер акцизов, таможенных пошлин и НДС	3,79	1	2,5	2,5
	<b>Доходы</b>	<b>29,7</b>			
28	Цена на нефть	13,46	2	2	2
29	Налоги, сборы во внебюджетные фонды	3,29	1	2	3
30	Валютный курс	4,98	1	3	2
<b>Средний ранг</b>			<b>145,91</b>	<b>248,265</b>	<b>205,705</b>
<b>Результат</b>			<b>1</b>	<b>3</b>	<b>2</b>

Наилучшие показатели у первого варианта, наихудшие у второго, третий вариант занимает промежуточное значение.

Полученные результаты позволяют нам в первом приближении оценить соотношения между «нечёткими» составляющими – природно-экологическими факторами – и «числовыми» – экономическими факторами. Для этого по вышеприведенной формуле оценки рангов необходимо рассчитать частные суммы рангов для природно-экологических и экономических факторов по каждой альтернативе и разделить их (табл. 14.10).

Таблица 14.10

**Соотношения между природно-экологическими и экономическими факторами альтернатив**

	Альтернатива (вариант)		
	1	2	3
Природно-экологические факторы	65,67	85,67	82,24
Экономические факторы	80,24	162,595	123,465
Соотношение, %	<b>81,8</b>	<b>52,7</b>	<b>66,6</b>

Как мы видим, величина этих соотношений достаточно значима и её нельзя свести к погрешности метода оценки. При таких величинах вклада нечётко определяемых факторов у лиц, принимающих решения, возникает неуверенность при выборе варианта. Она основана на неуверенности в достаточности исходной информации: на последующих стадиях инвестиционного процесса приведение показателей к сопоставимым величинам может кардинально изменить ситуацию.

Эта проблема – наличие неопределённости между двумя потоками информации – в последнее время приобретает всеобщий характер [Джордан, 2017]. Связано это с отставанием теории в разработке соответствующих показателей влияющих факторов применительно к решаемым прикладным задачам, число которых стремительно увеличивается. А поскольку точного решения такого рода задач не существует в принципе, поиск приемлемого решения – числового значения критерия – может быть получен только экспертным путём, а именно опросом лиц, принимающих решения. Эта проблема вполне решаема. Одним из таких путей как раз и является представление экспертных оценок как нечётких чисел, что требует специальных исследований, выходящих за рамки настоящей работы, и планируются авторами в ближайшем будущем.

Отсюда следует:

1. Предложенный подход позволяет свести всё многообразие показателей, используемых при моделировании сложных систем, к конечному числу вектор-факторов. При этом возникают неопределённости, которые, по крайней мере, можно с наперёд заданной точностью оценить сверху.

2. В рассмотренной задаче экономические факторы преобладают над природно-экологическими, причём это превосходство весьма заметное.

3. Соотношения между обычными числовыми оценками и нечёткой составляющей не являются постоянными и весьма различаются у разных альтернатив.

## Заключение

Сформулируем кратко наиболее важные результаты проведённых исследований.

Основным природным фактором, ограничивающим проведение логистических операций в Арктической зоне Российской Федерации, являются ледовые условия. Большую часть года, за исключением части Баренцева моря, акватории Северного Ледовитого океана, его морей и впадающих в них рек, покрыта льдом, что требует использования судов ледового класса и постоянной ледокольной проводки. Уменьшение площади ледяного покрова Арктического бассейна, вопреки мнению некоторых специалистов, не привело к облегчению судоходства: разрушение многолетних ледяных полей приводит к забиванию ими проливов и необходимости использования ледоколов в течение длительного периода.

Экологическая ситуация во всём регионе не является острой. Имеют место лишь небольшие участки акваторий с превышением допустимого уровня концентраций загрязняющих веществ, загрязнения почв и воздуха и нарушенных ландшафтов от местных источников воздействия. Единственным ограничивающим перевозку и развития транспортной инфраструктуры фактором являются особо охраняемые природные территории, но это ограничение не является критическим.

Портовая инфраструктура явно недостаточна для обеспечения возрастающих потребностей экономического развития региона. Строительство порта Сабетта на Ямале – единственного за последние десятилетия – не решает всей проблемы наметившейся тенденции возрастания грузоперевозок. Требуется строительство ещё нескольких новых и модернизация действующих портов и портопунктов.

Также требует кардинального пересмотра вся система управления водным транспортом, давно уже не отвечающая требованиям времени.

В результате проведенных исследований природных и экологических условий АЗРФ и прилегающих к ней территорий и акваторий установлено, что стандартный подход к моделированию морских логистических операций не может быть эффективно реализован вследствие множества факторов, влияющих на движение судов и выгрузку на берег. Поэтому требуется существенный пересмотр традиционных подходов к применяемым моделям и их кардинальная модернизация.

С этой целью разработаны алгоритмы, позволяющие путём сочетания экспертной оценки влияющих факторов и расчёта показателей при помощи математических моделей решать логистические задачи в АЗРФ. На одном модельном примере продемонстрированы возможности матричной модели для задачи выбора оптимальной альтернативы транспортировки грузов.

Реализованы две частные задачи по моделированию выгрузки из судна на берег в несколько точек в Обской и Тазовской губах Карского моря. Расчёты выполнены для реальных условий северного завоза. Установлено, что при выборе оптимальной точки расположения судна выигрыш по времени может достигать несколько суток, также значительным может быть экономический эффект. Предложенные методы и подходы могут быть расширены на оптимизацию выбора пунктов перевалки грузов и дислокации частей оперативного реагирования на чрезвычайные ситуации при доставке и транспортировке грузов по Северному морскому пути.

Особое место в моделировании маршрутов грузовых судов занимает хорошо известная в логистике задача коммивояжёра. Однако прямое её применение к условиям Арктики, в первую очередь из-за большого количества островов и сильной изрезанности береговой черты, затруднительно. Однако модернизация некоторых алгоритмов позволила получить эффективные решения, дающие возможность добиться существенной экономии времени при организации перевозок.

Несколько задач решены для трубопроводного транспорта. Это в первую очередь касается задач выбора оптимальных мест размещения нефтяных отгрузочных терминалов и прокладки трасс

магистральных нефте- и газопроводов. При решении этих задач широко использовались экспертные технологии, показавшие свою эффективность при наличии большого количества влияющих факторов.

Дальнейшее развитие исследований вопросов оптимизации перевозок в Арктике предполагает сочетание дифференциальных и комбинаторных моделей, в которые необходимо ввести весовые коэффициенты влияющих факторов, что, по мнению авторов, позволит разработать эффективные транспортно-экономические системы для всего макрорегиона, каким является Арктическая зона Российской Федерации.

## Список литературы

1. Агбалян Е.В. Состояние окружающей среды в Арктике // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 4. – С. 74–76.
2. Айзерман М.А., Алескеров Ф.Т. Выбор вариантов: (основы теории). – М.: Наука, 1990. – 240 с. – (Теория и методы систем. анализа; № 26).
3. Актуальные проблемы предотвращения, ликвидации разливов нефти в Арктике и методы оценки ущерба прибрежным территориям / В.И. Павленко, Ж. Муангу, В.Б. Коробов, А.С. Лохов // Арктика: экология и экономика. – 2015. – № 3(19). – С. 4–11.
4. Андрианов В.А. Формирование транспортной инфраструктуры российского сектора Арктики в XXI веке // Арктика и Север. – 2012. – № 9. – С. 118–139.
5. Арский Ю.М., Новикова М.В., Потапов И.И. Приразломное нефтяное месторождение // Экологическая экспертиза и оценка воздействия на окружающую среду. – 1996. – № 2. – С. 3–37.
6. Ассаул В.Н., Погодин И.Е. О транспортной задаче с экологическим критерием // Экономика и математические методы. – 2019. – Т. 55, № 2. – С. 58–64.
7. Атлас Архангельской области / [Гл. упр. геодезии и картографии; отв. ред. Н.А. Моргунова; текст сост. А.Г. Исаченко]. – М.: ГУГК при СМ СССР, 1976. – 72 с.: карты.
8. Атлас океанов: термины, понятия, справочные таблицы. – М.: ГУНК МО СССР, 1980. – 119 с.
9. Афраймович Л.Г. Поточковые алгоритмы исследования совместности иерархических систем распределения ресурсов с ограничениями // Вестник Нижегородского гос. ун-та. Математическое моделирование и оптимальное управление. – 2006. – № 2(31). – С. 129–138.
10. Безруков Л.А. Проблемы формирования транспортной системы сибирской Арктики // ЭКО. – 2018. – № 4 (526). – С. 29–47.
11. Безруков Л.А. Транспортно-экономические проблемы Красноярской Арктики // Интернет-журнал «Наукovedение». – 2017. – Т. 9, № 5. – С. 1–16. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/08EVN517.pdf> (Дата обращения: 10.11.2018).

12. Берега / П.А. Каплин, О.К. Леонтьев, С.А. Лукьянов, Л.Г. Никифоров. – М.: Мысль, 1991. – 479 с.

13. Беспятовых Ю.Н. Архангельск накануне и в годы Северной войны 1700–1721 / РАН, С.-Петербург. ин-т истории [и др.]. – СПб.: Рус.-Балт. информ. центр «БЛИЦ»; Историческая иллюстрация, 2010. – 678 с.: ил., карты, портр., факс.

14. Бизнес-сообщество Русского Севера: модели поведения / А.Г. Тутыгин, В.Б. Коробов, Л.А. Чижова, К.О. Малинина. – Ростов н/Д: Легион-М, 2018. – 244 с.

15. Блюмин С.Л., Шуйкова И.А. Модели и методы принятия решений в условиях неопределённости. – Липецк: ЛЭГИ, 2001. – 138 с.

16. Бразовская Я.Е. Синергия приарктических государств в соблюдении правил судоходства в полярных водах // Известия Юго-Западного гос. ун-та. Серия: История и право. – 2018. – Т. 8, № 4(29). – С. 46–54.

17. Булатов В.Н. Русский Север: в 5 кн. Кн. 1: Заволожье (IX–XVI вв.). – Архангельск: Издат. центр ПГУ им. М.В. Ломоносова, 1997. – 352 с.

18. Бутенина Н.В. Ленд-лиз: сделка века. – М.: ГУ ВШЭ, 2004. – 312 с.

19. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / А.В. Гасников, С.Л. Кленов, Е.А. Нурминский, Я.А. Холодов, Н.Б. Шамрай. – М.: Изд-во МЦНМО, 2013. – 429 с.

20. Виноградова А.А., Котова Е.И. Металлы в атмосферных осадках и в водах озёр на северо-западе России // Эколог. химия. – 2016. – Т. 25, № 1. – С. 52–61.

21. Виноградова А.А., Котова Е.И., Топчая В.Ю. Атмосферный перенос тяжелых металлов в районы севера европейской территории России // География и природные ресурсы. – 2017. – № 1. – С. 108–116.

22. Вишнева Ю.С., Попова Л.Ф. Оценка экологического состояния и степени загрязнения тяжёлыми металлами почв Арктики // Вестник Моск. гос. обл. ун-та. Серия: Естественные науки. – 2016. – № 2. – С. 96–104.

23. Володин А.А. Модель расстановки крупнотоннажного флота и ее реализация : сб. науч. трудов Союзморниипроект. – М.: Транспорт, 1976. – Вып. 39(45). – С. 55–60.

24. Воробьёв Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Системные аварии и катастрофы в техносфере России / МЧС России. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2012. – 308 с.

25. Геология Советской Арктики // Труды НИИ геологии Арктики М-ва геологии и охраны недр СССР. Т. 81. – М.: Госгеолтехиздат, 1957. – 520 с.

26. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. II : Белое море, вып. 1 : Гидрометеорологические условия. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 240 с.

27. Гольштейн Е.Г., Юдин Д.Б. Задачи линейного программирования транспортного типа. – М.: Наука. Физматлит, 1969. – 384 с.

28. Гордеева Н.М., Самойлова И.А. Корректное использование математической модели, называемой задачей коммивояжёра // Актуальные проблемы преподавания математики в техническом вузе. – 2018. – Т. 6. – С. 86–91.

29. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». Федеральное государственное унитарное предприятие «Атомфлот»: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rosatomflot.ru/> (Дата обращения: 10.11.2018).

30. Губайдуллин М.Г., Коробов В.Б. Экологический мониторинг нефтегазодобывающих объектов Европейского Севера России: учеб. пособие. – Архангельск: ИПЦ Северного (Арктического) федерального университета, 2012. – 236 с.

31. Губайдуллин М.Г., Коробов В.Б., Сарычев В.В. Анализ значимости факторов, влияющих на развитие нефтяной транспортной инфраструктуры в северо-восточной части европейского севера России // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – Вып. 4(110). – С. 138–145.

32. Губайдуллин М.Г., Коробов В.Б., Сарычев В.В. Факторы транспорта нефти // *Neftgaz.ru*: деловой журнал. – 2017. – № 3. – С. 99–103.

33. Дегтева П.В. Исследование грузооборота речного флота на территории северного морского пути // Вестник гос. ун-та мор. и реч. флота им. Адмирала С.О. Макарова. – 2019. – Т. 11, № 2. – С. 275–283.

34. Джордан Д. Роботы. – М.: Издат. группа «Точка», 2017. – 272 с.

35. Диксон П. Фабрики мысли. – М.: АСТ, 2004. – 505 с.

36. Елисеев Д.О., Наумова Ю.В. Проблемы и перспективы развития международного транзита по северному морскому пути // Федерализм. – 2019. – № 3(95). – С. 35–50.

37. Жариков Е.П. Морские перевозки нефти и газа: формирование восточного направления // Азиатско-Тихоокеанский регион: экономика, политика, право. – 2016. – Т. 18, № 4. – С. 38–52.

38. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 165 с.

39. Залогин Б.С., Косарев А.Н. Моря. – М.: Мысль, 1999. – 400 с.

40. Иванов Ю.Н., Токарев В.В., Уздемир А.П. Математическое описание элементов экономики. – М.: Физматлит, 1994. – 416 с.

41. Иванова Л.В., Соколов К.М., Харитоновна Г.Н. Тенденция загрязнения пластиком акваторий и побережья Баренцева моря и сопредельных вод в условиях изменения климата // Арктика и Север. – 2018. – № 32. – С. 121–145.

42. Исаченко А.Г., Шляпников А.А. Ландшафты. – М.: Мысль, 1989. – 504 с.
43. Канторович Л.В. О перемещении масс // Доклады АН СССР. – 1942. – Т. 37, № 7/8. – С. 227–229.
44. Кац Н.Я. Болота земного шара. – М.: Наука, 1971. – 295 с.
45. Клейнер Г.Б. Развитие теории экономических систем и ее применение в корпоративном и стратегическом управлении // ЦЭМИ РАН. – М., 2010. – 47 с.
46. Колоденкова А.Е. Топологический анализ структуры нечёткой когнитивной модели оценки реализуемости проекта по созданию информационно-управляющих систем для сложных технических объектов // Вестник УГАТУ. – 2016. – № 3(73). – С. 129–136.
47. Коробов В.Б. Географическое обоснование создания транспортной инфраструктуры Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Известия РАН. Серия географическая. – 2006. – № 4. – С. 87–98.
48. Коробов В.Б. Некоторые проблемы применения экспертных методов на практике // Научный диалог. – 2013. – № 3(15) : Естествознание. Экология. Науки о земле. – С. 94–108.
49. Коробов В.Б. О максимальных ветровых волнах в Белом море // Метеорология и гидрология. – 1991. – № 1. – С. 86–91.
50. Коробов В.Б. О методологии построения шкал для классификации природных объектов на основе балльных оценок // Проблемы региональной экологии. – 2002. – № 4. – С. 99–108.
51. Коробов В.Б. О правилах генерации альтернатив расположения объектов транспортной инфраструктуры при транспортировке нефти морским путем // Нефть, газ и бизнес. – 2005. – № 9. – С. 50–53.
52. Коробов В.Б. Ограничения при добыче и транспортировке нефти с северной части Тимано-Печорской провинции // Нефтепромысловое дело. – 2001. – № 4. – С. 64–67.
53. Коробов В.Б. Сравнительный анализ методов определения весовых коэффициентов «влияющих факторов» // Социология: методология, методы, математические модели. – 2005. – № 20. – С. 54–73.
54. Коробов В.Б. Теория и практика экспертных методов: моногр. / под ред. Б.И. Кочурова. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2019. – 281 с.
55. Коробов В.Б. Эколого-географическое обоснование экспертной оценки создания нефтяной транспортной инфраструктуры севера Тимано-Печорской провинции: дис. ... д-ра геогр. наук: 25.00.36. – М., 2004. – 422 с.: ил.
56. Коробов В.Б., Середкин К.А. Применение экспертных сетей для экологического районирования Белого моря // Известия Рос. акад. наук. Серия географическая. – 2016. – № 3. – С. 81–87.

57. Коробов В.Б., Тутьгин А.Г. Преимущества и недостатки метода анализа иерархий // Известия РПГУ им. А.И. Герцена. Серия «Естественные и точные науки». – 2010. – № 122. – С. 108–115.

58. Коробов В.Б., Тутьгин А.Г. Проблемы использования метода анализа иерархий и пути их решения // Экономика и управление. – 2016. – № 8. – С. 60–65.

59. Коробов В.Б., Тутьгин А.Г., Чижова Л.А. Последовательность принятия стратегических решений в задачах проектирования транспортной инфраструктуры в Арктике // Проблемы региональной экологии. – 2018. – № 5. – С. 70–77.

60. Коробов В.Б., Шумилова Ю.Н. К вопросу об определении южной границы Арктики // Экологические проблемы Арктики и северных территорий: межвуз. сб. науч. трудов. – Архангельск: САФУ, 2016. – Вып. 19. – С. 250–253.

61. Котляков В.М., Глазовский А.Ф., Фролов И.Е. Оледенение в Арктике. Причины и следствия глобальных изменений // Вестник Рос. Акад. наук. – 2010. – Т. 80, № 1. – С. 225–234.

62. Котова Е.И., Коробов В.Б., Павленко В.И. Экстремальные загрязнения на территории Арктической зоны Российской Федерации: случаи и анализ // Проблемы региональной экологии. – 2018. – № 1. – С. 67–72.

63. Кочуров Б.И. Экологически безопасное и сбалансированное развитие региона // Известия Рос. акад. наук. Серия географическая. – 2001. – № 4. – С. 87–92.

64. Кочуров Б.И., Турикешев Г.Т.Г. О современном направлении геоэкологии и тесной связи ее с тектоническими процессами в пределах Южного Предуралья // Проблемы региональной экологии. – 2014. – № 1. – С. 10–14.

65. Кочуров Б.И., Радионов А.С. Вариативный подход к устойчивому развитию (на примере Костромской области) // Проблемы региональной экологии. – 2014. – № 2. – С. 161–165.

66. Куратова Э. Морской порт в Бельковской губе: новые факторы развития «опорной зоны» Арктики // Вестник Коми респ. акад. гос. службы и управления. Серия: Теория и практика управления. – 2017. – № 19(24). – С. 76–79.

67. Лавренев И.В. Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. – СПб.: Гидрометеиздат, 1998. – 500 с.

68. Лебон Г. Психология народов и масс. – М.: Изд-во АСТ, 2018. – 384 с.

69. Левченко Н.Г., Рычкова В.Ф., Смирнов С.М. Предпосылки внедрения автоматизированной информационной системы управления транс-

портно-логистическими процессами в Арктике с применением нечетких нейросетевых технологий // Транспортное дело России. – 2016. – № 6. – С. 153–155.

70. Лисицын А.П. Ледовая седиментация в Мировом океане. – М.: Наука, 1994. – 448 с.

71. Литвак Б.Г. Экспертные технологии в управлении. – М.: Дело, 2004. – 400 с.

72. Ломазов А.В., Ломазов В.А., Петросов Д.А. Формирование иерархии оценочных показателей сложных динамических систем на основе экспертных технологий // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 7–4. – С. 760–764.

73. Лотош В.Е. Экономическая оценка возможных последствий катастрофы на территории крупного регионального центра // Экономика природопользования. – 2003. – № 3. – С. 65–73.

74. Лобковский Л.И., Никифоров С.Л. Аномальная эмиссия метана на арктическом шельфе: проблемы потепления климата и безопасного освоения ресурсов в Арктике // Арктические ведомости. – 2013. – № 3 (7). – С. 94–98.

75. Макоско А.А., Матишева А.В. Оценка тенденций дальнего загрязнения атмосферы регионов российской Арктики в XXI в. // Арктика: экология и экономика. – 2017. – № 4 (28). – С. 59–71.

76. Матвиенко И.И., Тутыгин А.Г., Чижова Л.А. Инвестиционная привлекательность муниципальных образований региона: моногр. – Архангельск: Изд-во «КИРА», 2012. – 248 с.

77. Мискевич И.В., Коробов В.Б., Губайдуллин М.Г. Оценка экологических рисков поражения зообентоса Печорского моря при безаварийном ведении хозяйственной деятельности по освоению месторождений углеводородного сырья // Проблемы региональной экологии. – 2014. – № 2. – С. 120–126.

78. Моделирование погрузочно-разгрузочных операций судна в процессе перевозок по Северному морскому пути / М.К. Есеев, В.Б. Коробов, Д.Н. Макаров, В.И. Матвеев, А.Г. Тутыгин // Arctic Environmental Research. – 2017. – № 4. – С. 273–282.

79. Моделирование разливов нефти в западном секторе Российской Арктики / М.Г. Губайдуллин, Н. Ёстбёл, А.Б. Золотухин, В.Б. Коробов, И.В. Мискевич, Ж.Р. Муангу, И.А. Немировская, П. Ренниген, М. Рид, К. Сёрхейм, И. Синсгаас, А.В. Сунгуров, В.П. Шевченко В.П. – Архангельск: САФУ, 2016. – 219 с.

80. Мощенко И.Н., Пирогов Е.В. К выбору оценочной шкалы в методе анализа иерархий // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4. – С. 96.

81. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3: Многолетние данные / Гос. ком. СССР по гидрометеорологии. Вып. 1: Архан-

гельская и Вологодская области, Коми АССР. Кн. 1, ч. 1–6 / Сев. террит. упр. по гидрометеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 483 с.: карт.

82. Немировская И.А., Реджепова З.Ю., Трубкин И.П. Загрязнение нефтью прибрежных районов российской Арктики // Водные ресурсы России: современное состояние и управление: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. (Сочи, 8–14 окт. 2018 г.): в 2-х т. – Новочеркасск: Изд-во ООО «Лик», 2018. – Т. 2. – С. 198–206.

83. О проекте «Белкомур» // Белкомур. URL: <http://www.belkomur.com> (Дата обращения: 03.12.2018).

84. О стратегических векторах социально-экономического развития арктической зоны республики Саха (Якутия) / В.И. Кондратьева, Н.А. Степанова, А.В. Трубина, А.С. Луковцева // Инновации. – 2018. – № 11 (241). – С. 67–72.

85. Оганесян В.В. Климатические изменения как факторы риска для экономики России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2019. – № 3 (373). – С. 161–184.

86. Огородов С.А. Роль морских льдов в динамике рельефа береговой зоны. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. – 173 с.

87. Ограничения на стандартные модели морских логистических операций в Арктике / А.Г. Тutyгин, В.Б. Коробов, Л.А. Чиждова, Е.О. Антипов // Управление экономическими системами: электрон. науч. журнал. – 2019. – № 3 (121). URL: <http://www.uecs.ru>.

88. Ожидаемые геолого-геоморфологические риски по трассе Северного морского пути / С.Л. Никифоров, Л.И. Лобковский, Н.Н. Дмитриевский, Р.А. Ананьев, Н.О. Сорохтин, А.В. Хортов, О.Ю. Богданова // Доклады Акад. наук. – 2016. – Т. 466, № 2. – С. 218–220.

89. Оледенение Северной Евразии в недавнем прошлом и в ближайшем будущем. – М.: Наука, 2007. – 268 с.

90. Оптимальные способы погрузочно-разгрузочных операций в процессе грузоперевозок по Северному морскому пути / М.К. Есеев, В.Б. Коробов, Д.Н. Макаров, В.И. Матвеев, А.Г. Тutyгин // Научное обозрение. – 2017. – № 19. – С. 95–103.

91. Орлов А.И. О развитии экспертных технологий в нашей стране (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – Т. 76, № 1. – С. 64–70.

92. Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование. Ч. 1: Нечисловая статистика. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 541 с.

93. Основные принципы сбалансированного социально-экономического развития территорий Арктической зоны Российской Федерации / В.И. Павленко, И.И. Меламед, С.Ю. Куценко, А.Г. Тutyгин, М.А. Авдеев, Л.А. Чиждова // Власть. – 2017. – № 6. – С. 7–17.

94. Острейковский В.А. Теория систем. – М.: Высш. школа, 1997. – 240 с.

95. Оценка площади болотных и заболоченных лесов России / С.Э. Вомперский, А.А. Сиринов, А.А. Сальников, О.П. Цыганова, Н.А. Валяева // Лесоведение. – 2011. – № 5. – С. 3–11.

96. Павлов С.П., Перегудов А.Б. Системный анализ и математические методы принятия решений. – Саратов: Саратовский гос. техн. ун-т, 2013. – 144 с.

97. Первые данные о составе пыли, окрасившей снег на Европейском Севере России в желтый цвет (март 2008 г.) / В.П. Шевченко, В.Б. Коробов, А.П. Лисицын, А.С. Алешинская, О.Ю. Богданова, Н.В. Горюнова, И.В. Грищенко, О.М. Дара, Н.Н. Завернина, Е.И. Куртеева, Е.А. Новичкова, О.С. Покровский, Ф.В. Сапожников // Доклады Акад. наук. – 2010. – Т. 431, № 5. – С. 675–679.

98. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. – М.: Астрейя-2000, 1999. – 768 с.

99. Петровский А.Б. Групповое многокритериальное принятие решений с несовпадающими предпочтениями // Научные ведомости Белгородского гос. ун-та. Серия: Экономика. Информатика. – 2009. – № 15(70). – С. 151–160.

100. Петровский А.Б. Теория принятия решений. – М.: Академия, 2009. – 400 с.

101. Попова В.Н. Накопление тяжёлых металлов фитоценозами западно-сибирской Арктики и субарктики // Современные проблемы науки и образования. – 2016. – № 5. – С. 317.

102. Постановление Правительства РФ № 44 от 19 января 2000 г. «Порядок создания, эксплуатации и использования, искусственных островов, сооружений и установок во внутренних морских водах и в территориальном море Российской Федерации» // Консультант плюс. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_25794/dc4ae38e88a735c32b19e0814aea9fe334b60e13/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_25794/dc4ae38e88a735c32b19e0814aea9fe334b60e13/) (дата обращения: 03.12.2018).

103. Постановление Правительства РФ от 21.04.2014 № 366 (ред. от 31.08.2017) «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации»» // Консультант плюс. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_72390/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_72390/) (дата обращения: 03.12.2018).

104. Почвы СССР / Т.В. Афанасьева, В.И. Василенко, Т.В. Терешина, Б.В. Шеремет. – М.: Мысль, 1979. – 380 с.: 16 л. цв. ил. – (Справочники-определители географа и путешественника).

105. Природа. Экология / сост. и подгот. к изд. ПКО «Картография»; гл. ред. В.М. Котляков; отв. ред. Г.Ф. Кравченко. – М.: Роскартография, 2007. – 495 с. – (Национальный атлас России: в 4 т.; 2004–2008, т. 2).

106. Прошутинский А.Ю. Колебания уровня Северного Ледовитого океана. – СПб.: Гидрометеоздат, 1993. – 216 с.

107. Разработка и апробация экспертно-аналитической системы принятия стратегических решений развития транспортной инфраструктуры Арктической зоны Российской Федерации (2014–2016). Рег. номер НИОКТР 01201458569. Тема ФНИР. Отчет № АААА–Б17–217032350057–5.

108. Раскин Л.Г., Кириченко И.О. Многоиндексные задачи линейного программирования. – М.: Радио и связь, 1982. – 240 с.

109. Распоряжение от 30 сентября 2018 года № 2101-р «Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года». URL: <http://static.government.ru/media/files/MUNhgWFddP3Uff9RJASDW9VxP8zwcB4Y.pdf> (Дата обращения: 03.12.2018).

110. Рачковская И.А. Логистика: учеб. пособие. – М.: Проспект, 2018. – 222 с.

111. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3: Северный Край. – Л.: Гидрометеоздат, 1972. – 663 с.

112. Российская Арктика в XXI веке: природные условия и риски освоения. – М.: Феория, 2013. – 144 с.

113. Российская экономика в 2002 году: тенденции и перспективы. – М.: Ин-т экономики переходного периода (ИЭПП), 2003. – 534 с.

114. Рохчин В.Е., Ветрова В.Н. Разработка сценарных условий долгосрочного развития региона // Вопросы территориального развития. – 2014. – № 6 (16). – С. 1–10.

115. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети. – М.: Книж. дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 360 с.

116. Сарычев В.В., Цыбин В.Ф., Губайдуллин М.Г. Нефтегазоперспективные комплексы Коротайхинской впадины Тимано-Печорской впадины // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: сб. статей по материалам юбил. конф., посв. 100-летию ПГУ. – Пермь, ПГНИУ, 2016. – С. 112–116.

117. Северный Ледовитый и Южный океаны / [Г.А. Баскаков, Р.М. Деменицкая, О.К. Леонтьев и др.]. – Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1985. – 501 с., 8 л. карт. – (География Мирового океана).

118. Собянин А.Д., Боровиков С.Е., Плюснин Ю.М. От «Критских коридоров» (система МТК) к «Системе транспортных евразийских коридоров» (СТЕК): доклад на Междунар. конф. «Перспективы Центральной Азии – транзитный мост между Европой и Китаем». – Алматы, 2005. URL: [http://conjunction.ru/sobianin\\_26-04-2005/](http://conjunction.ru/sobianin_26-04-2005/) (дата обращения: 13.06.2019).

119. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 376 с.

120. Стишов М.С. Особо охраняемые природные территории Российской Арктики: современное состояние и перспективы развития. – М.: WWF, 2013. – 427 с.

121. Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года : (одобрена Морской коллегией при Правительстве РФ 28.09.2012) // Консультант плюс. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_72390/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_72390/) (дата обращения: 03.12.2018).

122. Тараканов М.А. Транспортные проекты в Арктике: синхронизация, комплексность // Вестник Кольского науч. центра Рос. акад. наук. – 2014. – № 1. – С. 80–85.

123. Турчин В.Ф. Феномен науки: кибернетический подход к эволюции. – М.: ЭТС, 2000. – 368 с.

124. Тutyгин А.Г. Концепция создания комплекса моделей развития транспортной инфраструктуры Арктической зоны Российской Федерации // Научное обозрение. – 2016. – № 24. – С. 182–185.

125. Тutyгин А.Г., Амбросевич М.А. Модель распределения ресурсов в горизонтально-кооперированной организации // Современные подходы к исследованию и моделированию в экономике, финансах и бизнесе: материалы конф. Европ. ун-та в СПб и СПбЭМИ РАН. – СПб.: Изд-во Европ.ун-та в СПб, 2008. – С. 163–167.

126. Тutyгин А.Г., Антипов Е.О., Коробов В.Б. Матричное представление экспертных оценок в логистических моделях морских операций в Арктике // Современная мировая экономика: проблемы и перспективы в эпоху развития цифровых технологий и биотехнологии: сб. науч. статей по итогам работы 6-го междунар. круглого стола (15–16 сент. 2019 г.). – М., 2019. – С. 70–72.

127. Тutyгин А.Г., Коробов В.Б. Эколого-экономические аспекты выбора мест выгрузки генеральных и наливных грузов в Арктике // Экономико-математические исследования: математические модели и информационные технологии: Третьи чтения памяти профессора Б.Л. Овсиевича: материалы Всерос. конф., 7–9 ноября 2017 г. – СПб.: Нестор-История, 2017. – С. 245–248.

128. Тutyгин А.Г., Чижова Л.А. Методологический подход к формированию инвестиционных сценариев развития экономических систем // Экономика и предпринимательство. – 2015. – № 10-2 (63–2). – С. 66–69.

129. Учет вековой динамики климата Баренцева моря при планировании морской деятельности / Г.Г. Матишов, С.Л. Дженюк, В.В. Денисов, А.П. Жичкин, Д.В. Моисеев // Труды Кольского научного центра РАН. – 2013. – № 1 (14). – С. 56–71.

130. Федеральный закон от 14.03.1995. № 33-ФЗ «Об особо охраняемых природных территориях».

131. Федеральный закон от 28.07.2012 № 132-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части государственного регулирования торгового мореплавания в акватории Северного морского пути»

132. Федеральное агентство воздушного транспорта: [электронный ресурс]. URL: <http://www.favt.ru>.

133. Федеральная служба государственной статистики (Росстат): [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru> (дата обращения: 10.11.2018).

134. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. – М.: Мир, 1973. – 957 с.

135. Хрымов Н.Б. Морской аэродромный комплекс для Северного морского пути: концептуальная модель // Транспорт Российской Федерации. – 2015. – № 6 (61). – С. 28–31.

136. Чернокульский А.В. Климатология облачности в арктических и субарктических широтах по спутниковым и наземным наблюдениям и данным реанализа // Солнечно-земная физика. – 2012. – Вып. 21. – С. 73–78.

137. Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. – М.: Наука, 2006. – 226 с.

138. Шлык Н.Л., Балашова В.Е. Транспортное обеспечение внешне-торговых связей России: проблемы и перспективы развития // Вестник Хабаровского гос. ун-та экономики и права. – 2017. – № 2. – С. 4–13.

139. Шпак А.В., Серова В.А., Биев А.А. Современные проблемы транспортной инфраструктуры регионов российской Арктики // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2014. – № 6. – С. 31–35.

140. Шумаев В.А., Манушина А.П., Владимиров А.П. Развитие Арктики, логистики, транспорта и инфраструктуры // Экономика и предпринимательство. – 2016. – № 5 (70). – С. 966–969.

141. Царьков И.Н. Математические модели управления проектами. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 514 с.

142. Экспериментальное исследование испаряемости нефти с целью моделирования загрязнения природной среды при разливах на земную поверхность в Арктике / М.Г. Губайдуллин, А.С. Лохов, В.Б. Коробов, Г.М. Тарасова // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – Вып. 4(106). – С. 137–145.

143. Экспертная оценка соотношения затрат при строительстве нефтяной транспортной инфраструктуры в Арктике / А.Г. Тутыгин, В.Б. Коробов, М.Г. Губайдуллин, Л.А. Чижова // Управленческое консультирование. – 2018. – № 12. – С. 110–117. DOI 10.22394/1726-1139-2018-12-110-117.

144. Юдахин Ф.Н., Губайдуллин М.Г., Коробов В.Б. Экологические проблемы освоения нефтяных месторождений севера Тимано-Печорской провинции. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2002. – 315 с.

145. Ambrosio L., Kirchheim B., Pratelli A. Existence of optimal transport maps for crystalline norms // *Duke Math. J.* – 2004. – V. 125, Iss. 2. – P. 207–241.

146. Ambrosio L. Lecture Notes on Optimal Transport Problems // *Lecture Notes in Mathematics.* – Euro Summer School, 2000. – 56 p.

147. Arcis: [электронный ресурс]. – М., 2019. URL: <https://www.archives.gov/frc/arcis/about> (дата обращения: 11.10.2019).

148. Ashby W.R. *An Introduction to Cybernetics.* – London: Chapman&Hall Ltd, 1957. – 295 p.

149. Beckmann M. A continuous model of transportation // *Econometrica.* – 1952. – V. 20. – P. 643–660.

150. Benamou J.D., Brenier Y. A numerical method for the optimal time-continuous mass transport problem and related problems // *Contemp. Math.* – 1999. – V. 226. – P. 1–11.

151. Benamou J. D., Brenier Y. A computational fluid mechanics solution to the Monge-Kantorovich mass transfer problem // *Numer. Math.* – 2000. – V. 84. – P. 375–393.

152. Blokus-Roszkowska A., Smolarek L. Application of Simulation Methods for Evaluating the Sea Waterways Traffic Organisation // *ISRN Applied Mathematics.* – V. 2013. – P. 1–8.

153. Blokus-Roszkowska A., Smolarek L. Maritime traffic flow simulation in the Intelligent Transportation Systems theme: Conference: European Safety and Reliability Conference, ESREL – 2014. – At Wrocław, Polska. – P. 31–37.

154. Carlier G., Ekeland I. Equilibrium; structure of a bidimensional asymmetric city // *Nonlinear Analysis, Series B: Real World Applications.* – 2007. – V. 8, Is. 3. – P. 725–748.

155. Davila G., Kim Y.-H., Dynamics of optimal partial transport // *Calc. Var. Partial Differ. Equ.* – 2016. – V. 55, Is. 5. – P. 116–131.

156. Janis I.L. *Groupthink psychological studies of policy decisions and fiascoes* Groupthink psychological studies of policy decisions and fiascoes. – Boston: Houghton Mifflin. – 2nd ed. – 1982. – 349 p.

157. Jonker R., Volgenant T. Improving the Hungarian assignment algorithm // *Operations Research Letters.* – 1986. – T. 5, № 4. – С. 171–175.

158. Harrington E.C. The desirable function // *Industrial Quality Control.* – 1965. – V. 21, № 10. – P. 124–131.

159. <https://ria.ru/20111226/527007298.html> (дата обращения: 27.08.2019).

160. <http://oopt.info> (дата обращения: 27.08.2019).

161. <http://www.morvesti.ru/tems/detail.php?ID=62459> (дата обращения: 28.10.2019).

162. <https://seanews.ru/2017/11/18/portstat-gruzy-analiticheskij-servi>.

163. Land A.H., Doig A.G. An automatic method of solving discrete programming problems // *Econometrica: Journal of the Econometric Society*. – 1960. – С. 497–520.

164. Modeling and searching for optimal location of cargo vessel when unloading by helicopter in order to solve economic problems of sea transportation along Northern Sea Route / M.K. Eseev, V.B. Korobov, D.N. Markarov, V.I. Matveev // *Advances in Economics, Business and Management Research*. – 2017. – V. 38. – P. 163–167.

165. Impact of climate change and seasonal trends on the fate of Arctic oil spills, *AMBIO* / T. Nordam, D. Dunnebier, C. Beegle-Krause, M.D. Slagstad // *A Journal Of The Human Environment*. – 2017. – V. 46. – P. 442–452.

166. Predicting Summer Arctic Sea Ice Concentration Intraseasonal Variability Using a Vector Autoregressive Model / L. Wang, X. Yuan, M. Ting, C. Li // *Journal of Climate*. – 2016. – V. 29, № 4. – P. 1529–1543.

167. Rosenkrantz D.J., Stearns R.E., Lewis, II P.M. An analysis of several heuristics for the traveling salesman problem // *SIAM journal on computing*. – 1977. – T. 6, № 3. – С. 563–581.

168. Samanlioglu F., Ferrell W., Kurz M. An interactive memetic algorithm for production and manufacturing problems modelled as a multi-objective travelling salesman problem // *International Journal Of Production Research*. – 2012. – 50, 20. – P. 5671–5682.

169. Stoner J. Risky and cautious shifts in group decisions // *J. Exp. and Soc. Psychol*. – 1967. – V. 3. – P. 189–205.

170. The Arctic: Glacial Refugium or Area of Secondary Contact? Inference from the Population Genetic Structure of the Thick-Billed Murre (*Uria lomvia*), with Implications for Management / A. Tigano, M. Damus, T.P. Birt, J.A. Morris-Pocock, Y.B. Artukhin, L. Vicki Friesen // *Journal of Heredity*. – 1 May 2015. – V. 106, Is. 3. – P. 238–246.

171. Toyasaki F, Wakolbinger T, Kettinger W. The value of information systems for product recovery management // *International Journal of Production Research*. – 2013. – V. 51, № 4. – P. 1214–1235.

172. Wein R., Bliss L. Experiments crude oil spills on arctic plant communities // *Journal of Applied Ecology*. – 1973. – V. 10, № 3. – P. 671–682.



Научное издание

*Монография*

**Тутыгин** Андрей Геннадьевич

**Антипов** Евгений Олегович

**Коробов** Владимир Борисович

**ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ЛОГИСТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ  
В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**



Издание осуществляется в авторской редакции

---

Подписано в печать 05.09.2020. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офисная. Печ. л. 14,18. Тираж 500 экз. Заказ № 20076.

---

Издательство «КИРА»  
163061, г. Архангельск, ул. Поморская, 34, тел. (8182) 65-47-11.

---

Типография «КИРА»  
163061, г. Архангельск, ул. Поморская, 34, тел. (8182) 65-47-11.  
e-mail: ookira@yandex.ru