

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Тан Лиша



МЕТОДЫ СИСТЕМНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-
ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ УГОЛЬНОЙ КОМПАНИИ КИТАЯ

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Первухин Д.А.

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ УГОЛЬНОЙ КОМПАНИИ КИТАЯ.....	12
1.1 Анализ состояния, тенденций развития и потребления продукции угольной отрасли Китая	12
1.2 Анализ структуры внутреннего рынка угольной отрасли Китая.....	17
1.3 Оценка минерально-сырьевой базы угольной отрасли Китая	22
1.4 Анализ производственной деятельности угольной компании China Coal	29
1.4.1 Оценка объёмов и качества выпускаемой продукции China Coal	29
1.4.2 Анализ производственных мощностей China Coal	31
1.4.3 Обоснование системы технико-экономических показателей производственной деятельности компании	33
1.4.4 Анализ организационной структуры угольной компании Китая	36
1.5 Постановка задачи диссертационного исследования	39
1.6 Выводы по первой главе	41
ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УГОЛЬНОЙ КОМПАНИИ КИТАЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ	43
2.1 Оценка существующих методов оптимизации внутренних цепей поставок в угольной отрасли	43
2.2 Оценка особенностей и обоснование методологических основ оптимизации внутренних цепей поставок в угольной промышленности Китая.....	46
2.2.1 Ограниченность однокритериальных моделей управления цепями поставок.....	46
2.2.2 Необходимость динамического описания производственно-логистических систем	48
2.2.3 Обоснование и выбор алгоритма многокритериальной оптимизации внутренних цепей поставок в угольной промышленности	50
2.3 Оценка влияния параметрической неопределенности и вариативности на процессы функционирования производственно-логистической системы в угольной промышленности.....	52
2.4 Структурный анализ производственно-логистической системы угольной компании.....	58
2.5 Энтропийный подход к оценке структурной сложности производственно-логистической системы угольной компании	63
2.6 Прогнозирование объемов добычи продукции угольной компанией China Coal на ближайший период с учетом неопределенности и вариативности параметров.....	68
2.6.1 Регрессионная параметризация интегрального показателя результативности и факторов внешней среды.....	69

2.6.2	Сценарная параметризация производственных объёмов	72
2.7	Выводы по второй главе	76
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УГОЛЬНОЙ КОМПАНИИ КИТАЯ.....		78
3.1	Декомпозиция динамических процессов функционирования производственно-логистической системы	78
3.2	Формализация подсистем, параметров и ограничений производственно-логистической системы	80
3.3	Оценка структуры допустимого множества Парето-оптимальных решений и требуемых вычислительных ресурсов для моделирования.....	86
3.4	Обоснование системы исходных данных для моделирования процесса функционирования модели производственно-логистической системы.....	88
3.4.1	Обоснование исходных данных и параметров функционирования модели производственно-логистической системы	89
3.4.2	Разработка показателей и критериев функционирования модели производственно-логистической системы	93
3.4.3	Разработка векторной целевой функции и критериев оценки режимов функционирования модели производственно-логистической системы.....	95
3.5	Выводы по третьей главе	98
ГЛАВА 4 ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УПРАВЛЕНИЮ ВНУТРЕННЕЙ ЦЕПЬЮ ПОСТАВОК CHINA COAL		100
4.1	Методологические основы вычислительного эксперимента	100
4.2	Исходные данные для моделирования производственно-логистической системы China Coal	101
4.3	Применение вычислительного алгоритма NSGA-II в программной среде MATLAB для оптимизации процессов функционирования системы	105
4.4	Обоснование и выбор сбалансированного режима функционирования производственно-логистической системы угольной компании China Coal	107
4.5	Интерпретация результатов оптимизации и решения задачи в производственно-логистической системе	114
4.6	Разработка практических рекомендаций по совершенствованию процессов функционирования угольной компании China Coal.....	121
4.7	Выводы по четвёртой главе	124

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	127
ПРИЛОЖЕНИЕ А Описание и программная реализация многокритериальной динамической модели функционирования производственно-логистической системы в среде MATLAB.....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Помесячные данные по объемам и параметрам продукции обогатительных фабрик.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт внедрения.....	160
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	162

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время угольная промышленность Китайской Народной Республики сохраняет важнейшее системообразующее значение для эффективного функционирования национальной экономики, энергетической безопасности и обеспечения сырьевой основы базовых отраслей промышленности. В этих условиях результативность деятельности крупных угольных компаний определяется не только масштабами добычи угля, но и способностью обеспечивать согласованное функционирование взаимосвязанных производственных, перерабатывающих, транспортных, складских и сбытовых процессов. Для вертикально интегрированных компаний угольной отрасли внутренняя организация движения материальных потоков приобретает характер сложной многоуровневой системы, в которой параметры отдельных звеньев не могут рассматриваться изолированно, поскольку изменение режима работы одного участка неизбежно влияет на функционирование других элементов внутренней цепи поставок. Именно поэтому исследование производственно-логистических процессов угольной компании требует применения методов системного анализа, позволяющих перейти от представления отдельных технологических операций к формализованному рассмотрению их как единой производственно-логистической системы.

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена усложнением структуры и режимов функционирования внутренних производственно-логистических процессов крупных угольных компаний Китая в условиях роста масштабов добычи, территориальной удаленности подразделений друг от друга, неоднородности качественных и количественных характеристик угольной продукции и необходимости надежного выполнения требований потребителей. Современная угольная компания представляет собой не совокупность автономных подразделений, а внутреннюю цепь поставок, охватывающую добычу, переработку, транспортировку, складирование и отгрузку продукции. При этом управленческие решения в угольной компании должны приниматься с учётом временной поэтапной связанности запасов, технологической зависимости результатов переработки от параметров входного сырья, ограничений по мощностям и пропускной способности, а также необходимости поддержания устойчивого выполнения заказов на всём горизонте планирования. Вследствие этого локальные и статические подходы к управлению технологическими процессами в угольной компании оказываются недостаточными и требуют замены на системное исследование объекта путем перехода к его динамической многокритериальной формализации и моделированию.

Степень разработанности проблемы свидетельствует о значительном внимании исследователей к вопросам управления цепями поставок, моделирования производственных систем, многокритериальной оптимизации и эволюционных алгоритмов поиска решений в сложных системах. Вместе с тем, применительно к внутренним производственно-логистическим

процессам угольной компании сохраняется ряд недостаточно разработанных вопросов. Во-первых, многие исследования ограничиваются анализом отдельных подсистем и не рассматривают протекающие в них процессы как временную поэтапную взаимосвязанную систему потоков и запасов с точки зрения степени согласованности и сбалансированности по пропускной способности. Во-вторых, технологическая подсистема переработки часто задаётся в упрощённом виде, без явной параметризации зависимости выпуска продукции от объёма переработки и качества сырья. В-третьих, задачи согласования производственной результативности и выполнения требований потребителей нередко решаются путём априорного введения количественных критериев, что затрудняет содержательную интерпретацию компромиссных режимов функционирования производственно-логистической системы. Тем самым сохраняется методологический разрыв между системным исследованием внутренней цепи поставок угольной компании и построением её математической модели, пригодной для исследования компании и выбора сбалансированного режима её функционирования.

Объектом исследования является производственно-логистическая система угольной компании Китая, охватывающая процессы добычи угля, его переработки, хранения, транспортировки и отгрузки потребителям.

Предметом исследования являются методы системного анализа, моделирования и многокритериальной оптимизации сложных систем, применяемые для описания, формализации, анализа и обоснования режимов функционирования внутренней цепи поставок угольной компании Китая в условиях параметрической неопределённости и структурных ограничений.

Цель диссертационного исследования заключается в разработке научно обоснованных подходов, методов, моделей и практических рекомендаций по исследованию и совершенствованию производственно-логистических процессов угольной компании Китая в условиях неопределённости на основе применения методов системного анализа, моделирования сложных систем и многокритериальной оптимизации.

Идея диссертационного исследования состоит в разработке и применении методов системного анализа, моделирования сложных систем и многокритериальной оптимизации для описания, формализации и исследования производственно-логистических процессов угольной компании Китая как сложной системы, и обоснования согласованных и сбалансированных режимов их функционирования в условиях параметрической неопределённости с использованием исходных данных угольной компании China Coal.

Задачи исследования:

1. Провести системный анализ состояния и тенденций развития угольной отрасли Китая, угольной компании China Coal, а также определить её место и роль в минерально-сырьевом комплексе страны.

2. Провести оценку производственно-логистических процессов угольной компании как процессов, протекающих в сложной системе, и выявить основные структурные связи, ограничения и особенности взаимодействия её подсистем.

3. Разработать математическую модель функционирования и исследовать производственно-логистические процессы компании, провести оценку взаимосвязей между ее основными подсистемами и оценить выходные параметры системы в различных режимах.

4. Обосновать систему показателей оценки функционирования угольной компании и разработать многокритериальную постановку задачи, предусматривающую совместный учёт показателей ресурсной результативности и логистической устойчивости и выполнения заказов потребителей.

5. Осуществить планирование вычислительного эксперимента, провести эксперимент и провести анализ его результатов, выделив множество Парето-оптимальных решений, обосновать и выбрать рациональный, наиболее сбалансированный режим функционирования, а также разработать практические рекомендации по совершенствованию производственно-логистических процессов компании China Coal.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в разработке и обосновании подхода к системному исследованию производственно-логистических процессов угольной компании Китая, как сложной системы, на основе сочетания методов системного анализа, моделирования сложных систем и многокритериальной оптимизации в условиях параметрической неопределённости. В работе предложен научно-методический аппарат и комплекс моделей исследования производственно-логистических процессов угольной компании, обеспечивающий описание, формализацию процессов и взаимосвязей между основными подсистемами, обоснование согласованных и сбалансированных режимов их функционирования, а также поддержку принятия решений по совершенствованию работы угольной компании с использованием исходных данных корпорации China Coal.

В результате диссертационного исследования:

1. Разработан подход к системному исследованию производственно-логистических процессов угольной компании Китая, основанный на рассмотрении объекта как сложной системы, включающей взаимосвязанные подсистемы добычи, переработки, транспортировки, хранения и отгрузки угольной продукции.

2. Осуществлены разработка и построение многокритериальной модели исследования производственно-логистических процессов угольной компании, позволяющей формализовывать процессы и взаимосвязи между основными подсистемами, учитывать действующие технологические, структурные ограничения и исследовать различные режимы функционирования угольной компании.

3. Определены регрессионные взаимосвязи входных, внутренних и выходных параметров обогатительных фабрик на основе месячных производственных данных, что позволило включить в модель зависимости результатов переработки от характеристик входного сырья и объёмов переработки.

4. Проведено обоснование системы показателей оценки функционирования исследуемой производственно-логистической системы и разработана многокритериальная постановка задачи, предусматривающая совместный учёт показателей ресурсной результативности и логистической устойчивости и выполнения заказов потребителей.

5. Разработана и реализована вычислительная процедура получения и анализа множества Парето-оптимальных решений с использованием алгоритма NSGA-II, что позволило исследовать компромиссы между различными режимами функционирования производственно-логистической системы и обосновать выбор сбалансированного режима её работы.

6. На основе планирования, проведения вычислительного эксперимента и полученных результатов моделирования разработаны практические рекомендации по совершенствованию производственно-логистических процессов угольной компании в условиях параметрической неопределённости.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика по пунктам:

3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

11. Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества, надежности функционирования сложных систем управления и их элементов.

Теоретическая значимость результатов диссертационного исследования состоит в дальнейшем развитии научно-методического аппарата системного исследования динамических процессов функционирования угольной компании Китая, рассматриваемой в виде сложной производственно-логистической системы, включающей в себя комплекс взаимосвязанных подсистем добычи, переработки, транспортировки, хранения и отгрузки угольной продукции. Полученные результаты расширяют возможности применения методов системного анализа, моделирования сложных систем и многокритериальной оптимизации для исследования производственно-логистических процессов промышленного предприятия минерально-сырьевого комплекса Китая, уточняют подходы к описанию, формализации процессов и

взаимосвязей между основными подсистемами и параметрами их функционирования, включая временную поэтапную связанность запасов и технологическую зависимость результатов переработки от характеристик входного сырья, а также развивают научно-методические основы исследования таких процессов в условиях параметрической неопределённости.

Практическая значимость полученных результатов диссертационного исследования определяется возможностью использования разработанных подходов, моделей и рекомендаций при анализе, планировании и совершенствовании производственно-логистических процессов угольной компании. Полученные результаты могут быть использованы при формировании производственных программ, согласовании режимов добычи и переработки, управлении запасами, распределении потоков и выполнении требований потребителей. Практическая значимость результатов диссертационного исследования подтверждается актом о внедрении от 19.03.2026, выданным компанией Shengli Highland Oilfield Services Co., Ltd. (Приложение В).

Методология и методы исследования, использованные в работе, базируются на основных положениях общей теории систем, системного анализа, методах моделирования сложных систем, производственно-логистических процессов, статистического прогнозирования и принятия решений в условиях неопределенности. В работе угольная компания Китая представлена как сложная многоуровневая иерархическая система, в которой процессы добычи, переработки, транспортировки, хранения и отгрузки угольной продукции находятся во взаимосвязи и рассматриваются в единой функционирующей производственно-логистической системе. Такой подход позволяет анализировать производственные и логистические процессы не изолированно, а с учётом структурных связей между подсистемами, ограничений на их функционирование и влияния параметрической неопределённости на согласованность материальных потоков.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод оценки состояния и прогнозирования развития производственно-логистической системы угольной компании Китая в условиях неопределённости, основанный на энтропийной диагностике параметрической вариативности и сценарном прогнозировании объёмов добычи, позволяет выявлять основной источник отклонений и формировать интервальные входные параметры для последующего моделирования.

2. Многокритериальная динамическая модель функционирования производственно-логистической системы угольной компании Китая, учитывающая состояние запасов, технологическую зависимость переработки от параметров входного сырья и действующие инфраструктурные ограничения, позволяет совместно учитывать интегральный показатель ресурсной результативности и показатель логистической устойчивости и выполнения заказов,

получать множество Парето-оптимальных решений и обосновывать выбор сбалансированного режима функционирования системы.

Степень достоверности полученных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается комплексным анализом производственно-логистических процессов компании China Coal за 2013–2024 гг., корректным применением методов системного анализа, статистического и регрессионного анализа, прогнозирования, энтропийного анализа параметрической вариативности и многокритериальной оптимизации. Использование фактических данных компании, верификация прогнозных моделей, а также согласованность результатов моделирования и решения задачи оптимизации с действующими производственными и инфраструктурными ограничениями подтверждают надёжность полученных результатов и их практическую применимость.

Апробация результатов диссертации проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных. За последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных:

1. XXVI Международная научно-практическая конференция молодых учёных, студентов и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности, на транспорте и в логистике» (21–23 апреля 2026 г., г. Санкт-Петербург).

2. III Международная научно-практическая конференция «Международный форум молодых исследователей – 2025» (06 ноября 2025 г., г. Петрозаводск).

3. X Международная научно-практическая конференция «Инновации: от теории к практике» (30–31 октября 2025 г., г. Брест).

4. XI Всероссийская (с международным участием) научная конференция «Менеджмент, экономика, этика, техника: МЕЕТ-2025» (30–31 октября 2025 г., г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в формулировке цели и задач диссертационного исследования, разработке логики и структуры диссертации, а также в самостоятельном сборе, систематизации и анализе статистических и производственных данных о деятельности компании China Coal. Автором обосновано применение системного подхода к исследованию производственно-логистических процессов угольной компании и проведена декомпозиция основных подсистем, определяющих функционирование объекта исследования как сложной системы.

Автором самостоятельно проведён анализ исходных данных, получены корреляционно-регрессионные зависимости, осуществлено прогнозирование основных производственных технических и технологических показателей, а также проведена количественная оценка их параметрической вариативности, что позволило сформировать исходную информационную и расчётную основу для последующего моделирования.

На основе полученных результатов автором разработана многокритериальная модель исследования производственно-логистических процессов компании China Coal, выполнена её параметризация, разработана и реализована вычислительная процедура получения множества Парето-оптимальных решений с использованием алгоритма NSGA-II. Автор самостоятельно спланировал и провёл вычислительные эксперименты, осуществил анализ и интерпретацию полученных результатов, а также сформулировал практические рекомендации по совершенствованию производственно-логистических процессов компании. Все основные научные результаты, выводы и положения, выносимые на защиту, получены автором лично.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 7 печатных работах (пункты списка литературы № 1, 2, 4, 5, 6, 87, 108), в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (пункт списка литературы № 3, Приложение Г).

Структура диссертации

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырёх глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 138 наименований, и 4 приложений. Диссертация изложена на 162 страницах машинописного текста, содержит 13 рисунков и 62 таблицы.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ УГОЛЬНОЙ КОМПАНИИ КИТАЯ

Первая глава диссертационного исследования посвящена анализу структурных особенностей функционирования внутреннего угольного рынка Китая и выявлению источников его параметрической вариативности в период 2015—2025 гг. Рассматриваемый временной интервал характеризуется сочетанием институциональных преобразований, инфраструктурных ограничений и трансформации структуры спроса, что приводит к изменению режимов функционирования производственно-логистических систем угольных корпораций.

В главе последовательно анализируются пространственная конфигурация добычи и потребления, концентрация производства, институциональные механизмы регулирования, состояние минерально-сырьевой базы и технико-экономические параметры деятельности корпорации China Coal. Особое внимание уделяется выявлению структурных ограничений и факторов, формирующих вариативность производственных, логистических и качественных параметров функционирования системы.

Проведённый анализ позволяет перейти от описательной характеристики отрасли к постановке научной задачи, связанной с необходимостью формализованного согласования объёмных, качественных и логистических параметров производственно-логистической системы в условиях динамической изменчивости внешней среды. Тем самым первая глава формирует эмпирическую и институциональную основу исследования и задаёт граничные условия для разработки методологического инструментария, представленного во второй главе.

1.1 Анализ состояния, тенденций развития и потребления продукции угольной отрасли Китая

Угольная отрасль Китая характеризуется крупномасштабным производством и территориальной удалённостью звеньев добычи и потребления друг от друга. Годовой объём добычи превышает 4,7 млрд т, что формирует сложную производственно-логистическую систему с высокой степенью пространственной разобщённости её основных звеньев [34, 132]. Уголь сохраняет доминирующее положение в структуре первичного энергопотребления страны, обеспечивая значительную долю электро- и теплоэнергетики [34]. В этих условиях масштаб отрасли и территориальная удалённость производственных мощностей обуславливают необходимость согласования режимов функционирования добывающих, перерабатывающих и транспортных подсистем.

Структура конечного потребления характеризуется концентрацией спроса в электроэнергетике и энергоёмких отраслях промышленности [89, 112, 119]. Преобладание электроэнергетического сегмента формирует повышенные требования к стабильности объёмов и

качественных характеристик топлива. Как следует из рисунка 1, наибольшая доля потребления приходится на электроэнергетику, что усиливает зависимость отрасли от устойчивости топливных поставок. В таких условиях отклонения параметров добычи или переработки транслируются по всей производственно-логистической системе, формируя каскадную передачу ограничений между её звеньями.



Рисунок 1 — Потребление энергетического угля в Китае по направлениям конечного спроса [133]

Пространственная асимметрия добычи и потребления усиливает структурные ограничения. Основные ресурсы сосредоточены в северных и северо-западных регионах, тогда как крупнейшие центры потребления локализованы в восточных и юго-восточных провинциях. Такая конфигурация обуславливает высокую нагрузку на транспортную инфраструктуру и формирует зависимость режимов функционирования системы от пропускной способности железнодорожных и портовых узлов. Ограничения транспортного контура передаются в производственные режимы, влияя на распределение добычи и загрузку перерабатывающих мощностей.

Динамика добычи и потребления в 2015—2025 гг. отражает смену фаз роста и корректировки объёмов, что свидетельствует о параметрической вариативности функционирования отрасли [115, 130]. Как показано на рисунке 2, после периода роста наблюдаются фазы стабилизации и корректировки объёмов, что указывает на изменение режимов функционирования системы. Колебания загрузки мощностей и изменение объёмов внутреннего спроса приводят к перераспределению потоков внутри производственно-логистической системы.

Совокупность указанных особенностей формирует задачу согласования режимов добычи, переработки и транспортировки в условиях параметрической вариативности и

инфраструктурных ограничений, что обосновывает необходимость формализованного моделирования производственно-логистической системы крупных угольных корпораций.

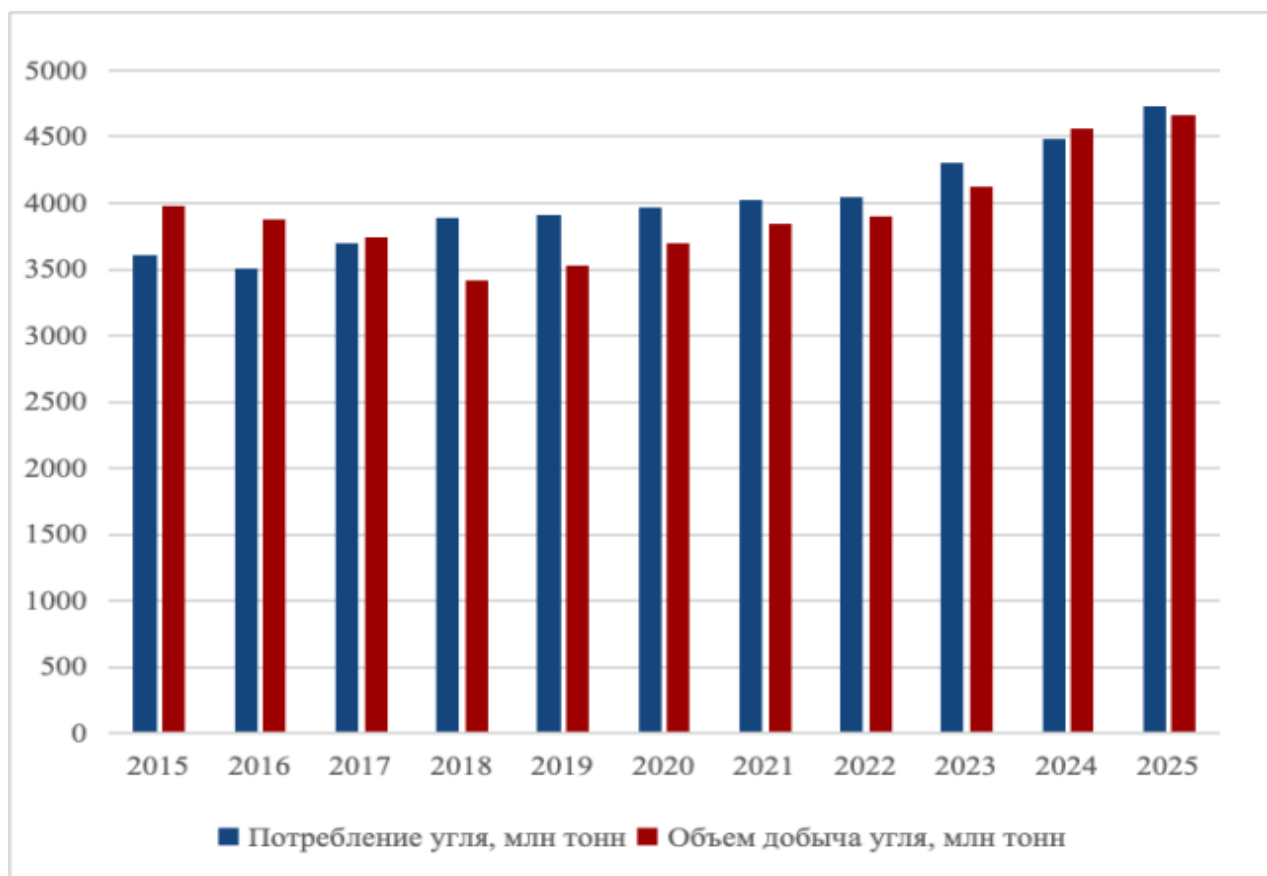


Рисунок 2 — Динамика добычи и потребления угля в Китае, 2015—2025 гг. [38]

В рассматриваемый период государственная политика Китая выступала не только внешним фоном развития угольной отрасли, но и прямым механизмом изменения параметров её функционирования. Регуляторные меры, направленные на ограничение роста добычи и снижение доли угля в энергобалансе, трансформировались в количественные ограничения производственных режимов и инфраструктурной загрузки [41].

Введение лимитов на эксплуатацию шахт и программы сокращения избыточных мощностей изменили предельные значения коэффициента использования производственных мощностей и сузили диапазон допустимых колебаний объёмов добычи [124]. Одновременно механизм долгосрочных контрактов, координируемый государственными органами, снизил амплитуду ценовых колебаний. Однако сокращение ценовой вариативности сопровождалось уменьшением рыночной гибкости системы: перераспределение потоков в условиях резкого изменения спроса стало осуществляться с задержкой, что повышало нагрузку на неконтрактный сегмент и усиливало локальные дефициты. Тем самым регуляторная стабилизация одних параметров сопровождалась ростом вариативности в других сегментах отрасли.

После 2020 г. структурная конфигурация отрасли изменилась под воздействием расширения возобновляемых источников энергии [14, 73, 105]. Нестабильность генерации ВИЭ

привела к переходу угольной генерации от режима базовой нагрузки к маневренным режимам резервирования [58]. Это изменило профиль спроса на уголь: вместо относительно стабильного потребления сформировались циклические режимы с более выраженной внутрисрочной и сезонной вариативностью [101]. В этих условиях добывающие и перерабатывающие звенья производственно-логистической системы столкнулись с необходимостью обеспечения большей гибкости поставок при одновременном наличии производственных лимитов [16, 108, 134]. Совокупность указанных факторов приводит к сокращению «регулируемого запаса» системы: при сужении диапазона допустимых режимов любое локальное отклонение параметров (снижение добычи, сбой транспортного узла, изменение спроса) приобретает более выраженный системный эффект.

Совокупность указанных факторов приводит к сокращению «регулируемого запаса» системы. При сужении диапазона допустимых режимов любое локальное отклонение параметров (снижение добычи, сбой транспортного узла, изменение спроса) имеет более выраженный системный эффект. В этих условиях устойчивость функционирования определяется не масштабом производства, а точностью координации внутренних потоков, что обосновывает необходимость формализованного многокритериального синтеза режимов функционирования производственно-логистической системы.

Функционирование угольной отрасли Китая в 2015—2025 гг. осуществляется также в условиях совокупности структурных ограничений, оказывающих прямое влияние на конфигурацию производственно-логистических потоков. Наиболее значимым фактором остаются транспортно-инфраструктурные ограничения. Пространственная разобщённость добычи и потребления приводит к высокой нагрузке на железнодорожные магистрали и портовые узлы, что формирует устойчивые «узкие места» в системе перевозок [43, 62]. Пропускная способность транспортной инфраструктуры выступает ограничивающим параметром распределения добычи и влияет на допустимые режимы функционирования производственно-логистической системы.

Дополнительным источником вариативности является изменение профиля спроса на угольную продукцию [98]. Постепенное снижение энергоёмкости экономики и рост доли альтернативной генерации приводят к изменению объёмов и структуры потребления [67, 68]. Это формирует риски недогрузки мощностей и усиливает зависимость добывающих предприятий от краткосрочных колебаний спроса. В результате параметры загрузки шахт и перерабатывающих мощностей приобретают более выраженный колебательный характер.

Циклические колебания цен и объёмов добычи усиливают нестабильность параметров функционирования отрасли. Периоды дефицита стимулируют расширение добычи, за которыми следуют фазы перепроизводства и корректировки объёмов. Даже в условиях государственного

регулирования сохраняется вариативность ценовых и объёмных параметров, что влияет на финансово-ресурсные ограничения предприятий и изменяет допустимые диапазоны производственных режимов.

Качественные характеристики добываемого угля также претерпевают изменения. Снижение средней теплотворной способности и увеличение доли низкокалорийного топлива влияют на выход товарной продукции и эффективность использования ресурсов [99, 107]. Рост издержек, зафиксированный в индексах цен производителей, отражает увеличение затрат на безопасность и разработку более сложных пластов, что изменяет экономико-технические параметры добычи [114, 126].

Следовательно, совокупность инфраструктурных ограничений, колебаний спроса, цикличности добычи и изменения качественных характеристик формирует параметрическую вариативность отрасли, которая должна учитываться при моделировании производственно-логистической системы угольных корпораций.

Согласно большинству академических и институциональных прогнозов, в среднесрочной перспективе до 2035 г. ожидается достижение пика потребления угля в середине 2020-х годов с последующим постепенным снижением его доли в энергобалансе [31–33]. Однако количественное сокращение объёмов потребления отражает лишь одну сторону структурных изменений.

Более существенным фактором становится трансформация временного профиля спроса. Расширение возобновляемой генерации приводит к тому, что угольная энергетика постепенно переходит от режима базовой нагрузки к режимам маневренного резервирования [10]. В результате при снижении среднего уровня потребления возрастает амплитуда краткосрочных колебаний спроса, усиливается внутрисрочная и сезонная вариативность потребления топлива. Речь идёт не только о количественном сокращении, но и об изменении распределения спроса во времени [30, 113].

Для сопряжённых производственно-логистических систем это означает одновременное действие двух разнонаправленных факторов. С одной стороны, средний коэффициент загрузки добывающих, транспортных и портовых мощностей снижается [42, 128]. С другой стороны, возрастает требование к способности системы оперативно реагировать на краткосрочные пики потребления. Это усиливает роль складских мощностей, страховых запасов и координации режимов поставок между шахтами, перерабатывающими предприятиями и электростанциями. При этом потребность в инфраструктурной готовности не снижается пропорционально сокращению средних объёмов.

Дополнительным ограничением выступает высокая доля фиксированных издержек и инерционность транспортной инфраструктуры. Железнодорожные магистрали, портовые

терминалы и перерабатывающие комплексы обладают значительной капиталоемкостью и не могут быть быстро адаптированы к изменению объемов перевозок. В условиях снижения средних потоков это приводит к росту удельных логистических затрат и изменению параметров функционирования системы.

Таким образом, состояние и тенденции развития угольной отрасли Китая в рассматриваемый период характеризуются сочетанием крупномасштабного производства, пространственной асимметрии добычи и потребления, регуляторных и инфраструктурных ограничений, а также нарастающей параметрической вариативности спроса, качества продукции и режимов загрузки мощностей. Эти особенности формируют новые граничные условия функционирования производственно-логистических систем угольных компаний и обосновывают необходимость их формализованного исследования как сложных динамических систем, в которых согласование режимов добычи, переработки, транспортировки и сбыта должно осуществляться с учётом изменчивости параметров и ограничений во времени.

1.2 Анализ структуры внутреннего рынка угольной отрасли Китая

Для формализации условий функционирования производственно-логистической системы угольной компании необходимо учитывать структуру и степень концентрации национального рынка. Рыночная конфигурация определяет характер конкуренции, распределение производственных мощностей, ценовую динамику и устойчивость спроса, что напрямую влияет на режимы функционирования производственно-логистической системы.

В условиях китайской угольной отрасли рыночная структура формируется под воздействием одновременно трёх факторов: пространственной концентрации добычи, институциональной политики консолидации отрасли и трансформации структуры конечного спроса. Эти обстоятельства задают ограничения на объёмы реализации, ценовые параметры и возможности перераспределения потоков между регионами.

Анализ рыночной структуры в данном разделе направлен не только на описание степени концентрации и распределения участников рынка, но и на выявление тех характеристик, которые впоследствии трансформируются в ограничения и параметры динамической модели производственно-логистической системы.

Для характеристики структуры внутреннего рынка использованы показатели CR3, CR5 и CR10, рассчитанные по данным NBS и CNCA за 2022–2025 гг. [49, 79]. Указанные показатели отражают степень централизации производства и позволяют определить долю системообразующих производителей в совокупном объёме добычи. В рамках настоящего исследования концентрационные индикаторы применяются не для оценки конкурентных стратегий, а для анализа институциональной конфигурации отрасли. Высокая концентрация

интерпретируется как фактор, влияющий на характер координации производственных потоков и режим функционирования системы [60, 63].

Концентрационные показатели свидетельствуют о доминировании ограниченного числа крупных холдингов: CR10 превышает 50%, CR5 составляет около 39% (таблица 1) [23, 37, 80]. Это означает, что значительная часть добычи сосредоточена в рамках интегрированных корпоративных структур, обладающих возможностью внутрикорпоративной координации потоков.

Таблица 1 — Концентрационные показатели угольного рынка КНР (2022—2025 гг.) (составлено автором по данным *NBS, CNCA* [22, 23, 80])

Показатель	2022, %	2025, %	Примечание
CR3	27,0	27,5	Сумма долей трёх крупнейших производителей
CR5	38,5	39,2	Сумма долей пяти крупнейших производителей
CR10	50,2	51,5	Сумма долей десяти крупнейших производителей

Динамика доли крупнейших компаний в национальной добыче подтверждает усиление централизации производства (таблица 2). За период 2017—2025 гг. доля трёх крупнейших компаний увеличилась с 14% до 25%, а совокупная доля десяти крупнейших компаний — с 28% до 47,5%. Указанная тенденция отражает рост степени концентрации принятия решений в сфере добычи и распределения производственных потоков.

Таблица 2 — Динамика доли крупнейших компаний в добыче угля в КНР (2017—2025 гг.) (составлено автором по данным *NBS, CNCA* [22, 23, 80])

Год	Три крупнейших компании	Десять крупнейших компаний
2017	14,0	28,0
2019	15,0	30,5
2021	19,0	36,0
2023	22,0	45,0
2025	25,0	47,5

Крупнейшие производители представлены в таблице 3 и на рисунке 3. Лидирующие позиции занимают государственные холдинги с вертикальной интеграцией добычи, переработки и энергетических активов, что обеспечивает структурную связность производственных и логистических процессов.

Таблица 3 — Крупнейшие угольные компании КНР по добыче (2025 г.) (составлено автором по данным [135])

Компания	Добыча, млн т	Доля рынка, %	Примечание
China Energy Investment Corp.	~620	4,0	Национальный лидер, вертикальная интеграция
Jinneng Holding Group	~300	7,0	Региональный холдинг провинции Шаньси
Shandong Energy Group	~270	6,5	Консолидация с <i>Yankuang</i>
China Coal	~300	6,0	Центральный госхолдинг

Продолжение таблицы 3

Компания	Добыча, млн т	Доля рынка, %	Примечание
Shanxi Coal Group	~260	5,5	Крупнейший региональный производитель
Shanxi Coking Coal Group	~240	5,0	Специализация на коксующемся угле
Huaneng Group	~200	4,0	Энергетический концерн с собственными шахтами
Lu'an Chemical Group	~180	3,5	Добыча + углехимия
State Power Investment Corp. (SPIC)	~160	3,0	Государственный энергоконцерн
Huaihe Energy Group	~150	2,8	Ключевой игрок Восточного Китая
Прочие	>2700	43,0	Средние и малые компании

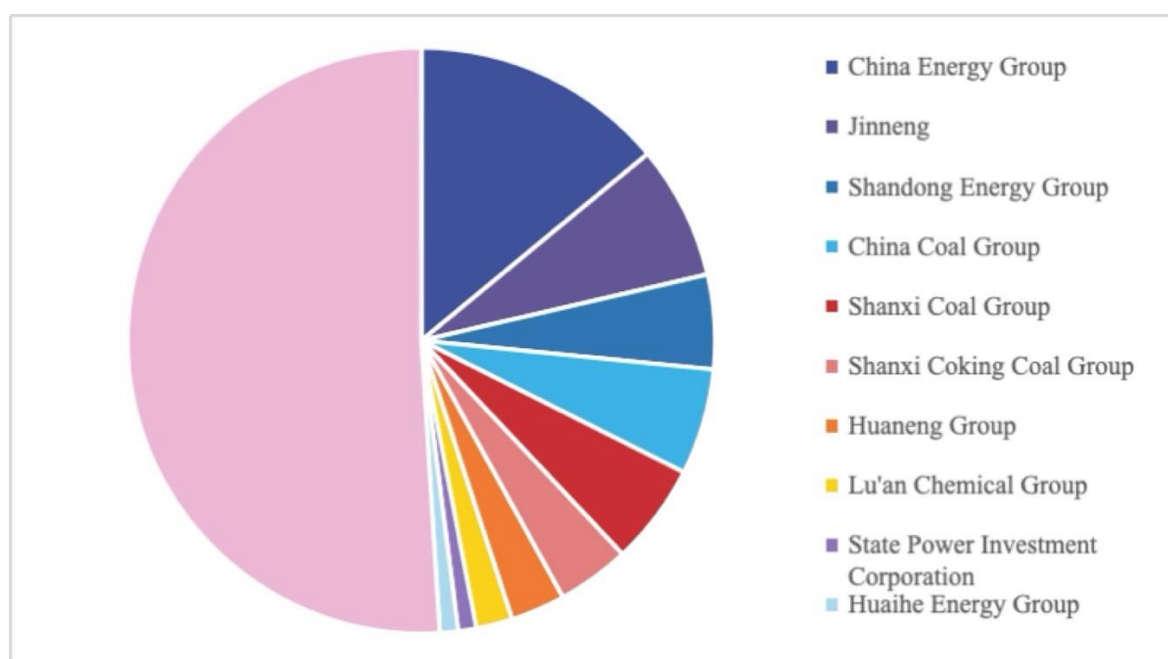


Рисунок 3 — Доли крупнейших компаний на рынке угля КНР (2025 г.) [135]

Отдельного внимания заслуживает корпорация China Coal. Компания располагает контролируемыми запасами угля свыше 60 млрд т и годовой производственной мощностью около 300 млн т. Высокая концентрация активов в сочетании с вертикальной интеграцией добычи, переработки и распределения продукции формирует устойчивый контур функционирования, в рамках которого значительная часть решений по добыче, переработке и распределению потоков принимается на корпоративном уровне. Существенная часть поставок осуществляется на основе долгосрочных контрактов с фиксированными параметрами объема и ценового диапазона, что ограничивает возможности оперативного перераспределения потоков [103, 120].

С точки зрения параметрической вариативности данная институциональная структура оказывает двойственное воздействие. Внутрикорпоративная координация и контрактная фиксация потоков снижают чувствительность системы к краткосрочным колебаниям спроса и

цен. Одновременно высокая степень централизации ограничивает оперативность перераспределения ресурсов при структурных сдвигах спроса, поскольку изменение производственных режимов связано с инерционностью крупных интегрированных структур и контрактными обязательствами [39]. В результате уменьшается высокочастотная компонента вариативности, но возрастает вероятность накопления низкочастотных диспропорций между добычей, транспортировкой и потреблением.

Следовательно, рыночная структура трансформирует форму параметрической вариативности производственно-логистической системы, изменяя частотную характеристику колебаний при сохранении значимости структурных ограничений для координации потоков.

Преобладание долгосрочных контрактов предполагает фиксацию количественных параметров поставки и ограниченный диапазон изменения ценовых условий. Дополнительно государственное регулирование добычи устанавливает верхние границы производственных режимов.

Для целей последующего моделирования указанные факторы интерпретируются как совокупность параметрических ограничений, включающих предельные объёмы поставок по контрактным обязательствам, допустимые диапазоны изменения ценовых параметров, а также ограниченную возможность оперативного перераспределения материальных потоков между потребителями в условиях инфраструктурных и временных ограничений.

Тем самым анализ рыночной структуры связывает макроэкономическую характеристику отрасли с формализацией режимов функционирования производственно-логистической системы China Coal [20, 31]. China Coal рассматривается как репрезентативный объект исследования благодаря высокой степени вертикальной интеграции и типичной для отрасли конфигурации потоков «добыча — переработка — транспортировка — конечный потребитель» [82, 91]. Это позволяет использовать её структуру для параметризации модели в условиях высокой концентрации и институциональных ограничений.

Государственное регулирование формирует институциональные границы функционирования отрасли, задавая допустимые режимы добычи, ценового поведения и инвестиционной активности. Данные механизмы оказывают непосредственное влияние на параметры производственно-логистической системы. Стратегическое планирование в рамках XIII и XIV пятилетних планов сопровождалось закрытием устаревших мощностей, квотированием добычи и установлением предельных объёмов производства на уровне провинций и отдельных корпораций. Расширение добычи сверх установленного лимита требует согласования с регулятором, что формирует верхнюю границу производственного режима и ограничивает возможность оперативного наращивания объёмов в ответ на краткосрочные ценовые сигналы [123].

Консолидация активов посредством слияний и реорганизации (в том числе формирование укрупнённых холдингов Jinneng, Shandong Energy, интеграция Shenhua и Guodian) привела к усилению концентрации и централизации управления потоками. В результате перераспределение ресурсов между активами осуществляется преимущественно на корпоративном уровне, что снижает роль рыночных механизмов координации.

Ценовое регулирование реализуется через систему долгосрочных контрактов с индикативными ценовыми коридорами для стандартных марок угля (в частности, 5500 ккал/кг, порт Циньхуандао). В периоды резких ценовых колебаний регулятор осуществляет административное вмешательство, ограничивая спекулятивные операции и устанавливая допустимый диапазон изменения цен. Это снижает эластичность спроса на уголь со стороны генерации и ограничивает возможность полного переноса ценовых колебаний, уменьшая амплитуду краткосрочной волатильности, но одновременно ослабляя ценовой сигнал как механизм быстрого перераспределения потоков.

Оперативные меры регулирования добычи, включая практику ограничения числа рабочих дней шахт (276/330) и проведение масштабных проверок безопасности, используются для балансировки предложения. Эти инструменты создают дополнительный механизм дискретной корректировки объёмов и усиливают зависимость производственных режимов от административных решений.

Тарифное регулирование в электроэнергетике, допускающее ограниченный диапазон изменения оптовых цен ($\pm 20\%$) при сохранении обязательств по стабильности поставок для социально значимых потребителей, формирует жёсткую взаимосвязь между угольным и энергетическим сегментами.

Экологическое и климатическое регулирование, включая нормы по выбросам, требования по рекультивации, контроль метана и функционирование национальной системы мониторинга выбросов с 2021 г. [65], оказывает долгосрочное влияние на структуру спроса и инвестиционные решения. Эти факторы формируют понижающий тренд предельных допустимых объёмов угольной генерации в средне- и долгосрочной перспективе [26].

Налогово-бюджетные инструменты, включая адвалорный ресурсный налог, экологические платежи и субсидии на закрытие шахт, оказывают влияние на структуру издержек и перераспределение финансовых потоков в отрасли. Приоритетная поддержка системообразующих компаний усиливает дифференциацию условий функционирования участников рынка. Совокупность указанных механизмов формирует регулируемый режим функционирования отрасли. Конкуренция при этом сохраняется, однако реализуется в пределах административно заданных условий, что изменяет характер параметрической вариативности:

краткосрочные колебания сглаживаются, тогда как структурные изменения могут накапливаться до момента последующей административной корректировки режима.

Совокупность ресурсных, финансовых, административных, инфраструктурных и экологических ограничений формирует высокие барьеры входа на внутренний рынок угольной отрасли (таблица 4). Данные ограничения закрепляют существующую структуру производства и препятствуют быстрой смене состава участников.

Таблица 4 — Основные барьеры входа в отрасль (IEA, CNCA, NDRC; обобщение автора [134, 136])

Тип барьера	Содержание	Иллюстративный источник
Ресурсный	Крупные лицензионные участки закреплены за госкомпаниями	CNCA
Финансовый	Капиталоёмкость шахты 10 млн т/год — десятки млрд юаней	IEA 2025
Административный	Лицензии, квоты, экспертизы, проверки безопасности	NDRC/NBS
Инфраструктурный	ЖД/портовая инфраструктура под контролем лидеров	Отчёты компаний
Экологический	Жёсткие нормы, СТВ, цели 2030/2060	IEA; Dialogue.Earth

Закрепление крупных лицензионных участков за государственными корпорациями ограничивает доступ к ресурсной базе. Высокая капиталоемкость строительства шахт промышленного масштаба и длительный инвестиционный цикл повышают финансовые требования к потенциальным участникам. Административные процедуры лицензирования, квотирования и контроля безопасности создают институциональные фильтры допуска. Контроль ключевой железнодорожной и портовой инфраструктуры со стороны лидеров усиливает инфраструктурную зависимость, а экологические нормативы и функционирование системы торговли выбросами формируют дополнительные долгосрочные ограничения.

В совокупности данные факторы закрепляют олигополистическую структуру рынка и ограничивают возможность быстрой адаптации отрасли через вход новых производителей. С точки зрения параметрической вариативности это означает снижение структурной гибкости системы: корректировка совокупного предложения осуществляется преимущественно через изменение режимов функционирования действующих предприятий, а не через перераспределение долей между участниками [78, 122].

1.3 Оценка минерально-сырьевой базы угольной отрасли Китая

Функционирование производственно-логистической системы угольной компании определяется не только рыночной конъюнктурой и институциональными условиями, но и параметрами минерально-сырьевой базы, формирующей ресурсные ограничения системы. Объём разведанных запасов, их территориальная концентрация, глубина залегания и качество

угля определяют предельные возможности добычи, технологические режимы переработки и структуру транспортных потоков.

В условиях китайской угольной отрасли ресурсная база характеризуется значительной территориальной диспропорцией и неоднородностью качественных характеристик. Это обстоятельство формирует пространственную конфигурацию производственно-логистической сети и влияет на себестоимость, потребность в обогащении и устойчивость долгосрочного развития отрасли.

Оценка минерально-сырьевой базы в данном разделе направлена на выявление ресурсных и качественных ограничений, которые в дальнейшем трансформируются в технологические параметры и ограничения динамической модели производственно-логистической системы.

Китай располагает одной из крупнейших в мире минерально-сырьевых баз угля. По данным Geological Survey of China и международных энергетических организаций, на уголь приходится около 94 % совокупных запасов ископаемых энергоресурсов страны [66]. Доказанные извлекаемые запасы оцениваются в диапазоне 200–210 млрд т, что соответствует 13–15 % мировых запасов [138].

Системное значение данного показателя заключается не столько в его абсолютной величине, сколько в пространственной концентрации ресурсов. Основные угленосные бассейны сосредоточены в северных и северо-западных регионах (Внутренняя Монголия, Шаньси, Шэньси, Синьцзян), тогда как крупнейшие центры потребления расположены на восточном и юго-восточном побережье. Данная пространственная асимметрия формирует протяжённую конфигурацию транспортных потоков и предопределяет высокую нагрузку на железнодорожную инфраструктуру. Динамика доказанных запасов в 2015—2025 гг. представлена в таблице 5.

Таблица 5 — Динамика доказанных запасов угля в Китае (2015—2025 гг.) (составлено автором по данным Министерства природных ресурсов КНР, *CNCA, NBS, IEA* [23, 79])

Год	Доказанные запасы, млрд т	Изменение к предыдущему году, %	Примечание
2015	115,0	—	Базовый уровень, начало периода
2016	116,2	+1,0	Незначительное увеличение за счёт доразведки
2017	117,5	+1,1	Сохранение роста запасов
2018	114,5	—2,6	Корректировка оценок запасов
2019	120,0	+4,8	Вовлечение новых месторождений
2020	135,0	+12,5	Масштабные геологоразведочные работы
2021	162,0	+20,0	Активное вовлечение западных регионов
2022	170,0	+4,9	Продолжение расширения базы
2023	207,9	+22,3	Рекордный прирост (+45,6 млрд т)
2024	210,0	+1,0	Стабилизация оценок
2025	212,0	+0,9	Сохранение тенденции роста

Рост оценок запасов после 2020 г. связан преимущественно с вовлечением западных регионов в активную геологоразведку. Это означает смещение ресурсной базы в сторону территорий с большей удалённостью от основных центров потребления. Следовательно, увеличение запасов не сокращает логистическое плечо, а потенциально усиливает пространственную диспропорцию между добычей и спросом.

На мировом уровне Китай входит в тройку стран-лидеров по запасам угля (рисунок 4), однако для целей настоящего исследования более существенна внутренняя структура размещения ресурсов, а не глобальное сопоставление.

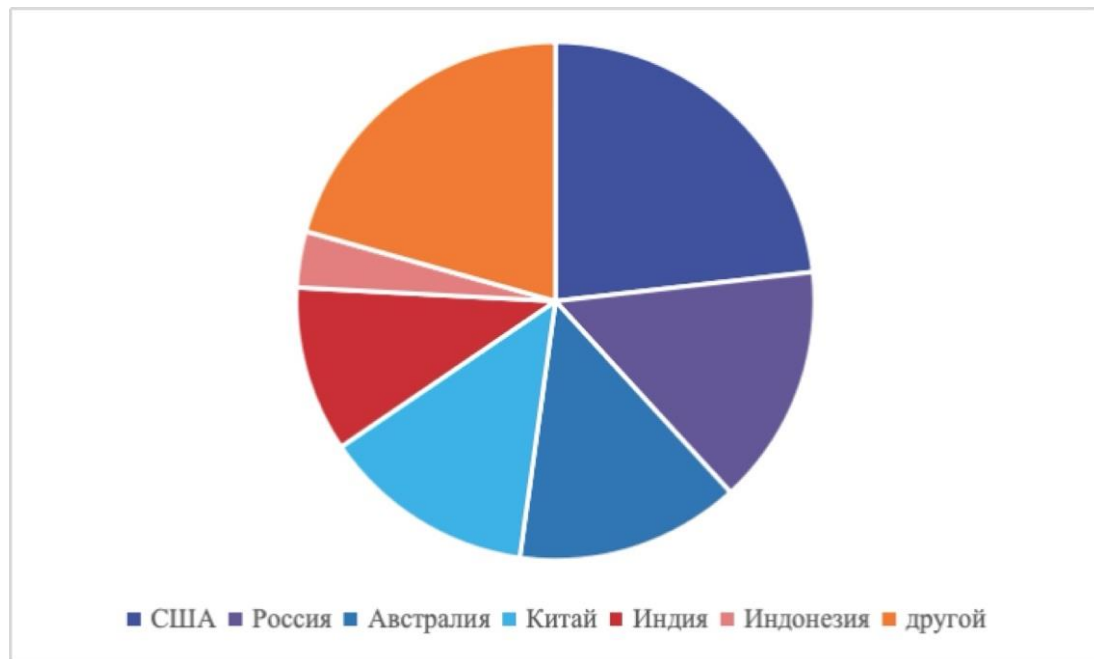


Рисунок 4 — Запасы угля в разных странах мира, % [38]

Следовательно, минерально-сырьевая база угольной отрасли характеризуется высокой обеспеченностью и выраженной территориальной концентрацией. Эти особенности формируют долгосрочную инерционность предложения и задают пространственные параметры функционирования производственно-логистической системы.

Минерально-сырьевая база угля Китая характеризуется выраженной территориальной концентрацией. Более 75 % разведанных запасов сосредоточено в северных и северо-западных регионах страны [54, 69]. Пространственная конфигурация ресурсов формирует асимметрию между районами добычи и основными центрами потребления [125].

Наибольший объём разведанных запасов сосредоточен в провинциях Шаньси, Синьцзян, Внутренняя Монголия и Шэньси. Совокупно данные регионы формируют основной добывающий контур, обеспечивающий преобладающую часть национального объёма производства. Их расположение в северной и северо-западной части страны предопределяет направленность потоков преимущественно в сторону восточных и южных промышленных регионов. Распределение запасов представлено на рисунке 5.

Южные и прибрежные провинции характеризуются ограниченной собственной ресурсной базой. В результате формируется протяжённая система межрегиональных перевозок, где уголь транспортируется на значительные расстояния по железнодорожным магистралям с последующей перевалкой в портах. Такая конфигурация приводит к формированию устойчивого направления «северо-запад — восточное побережье».

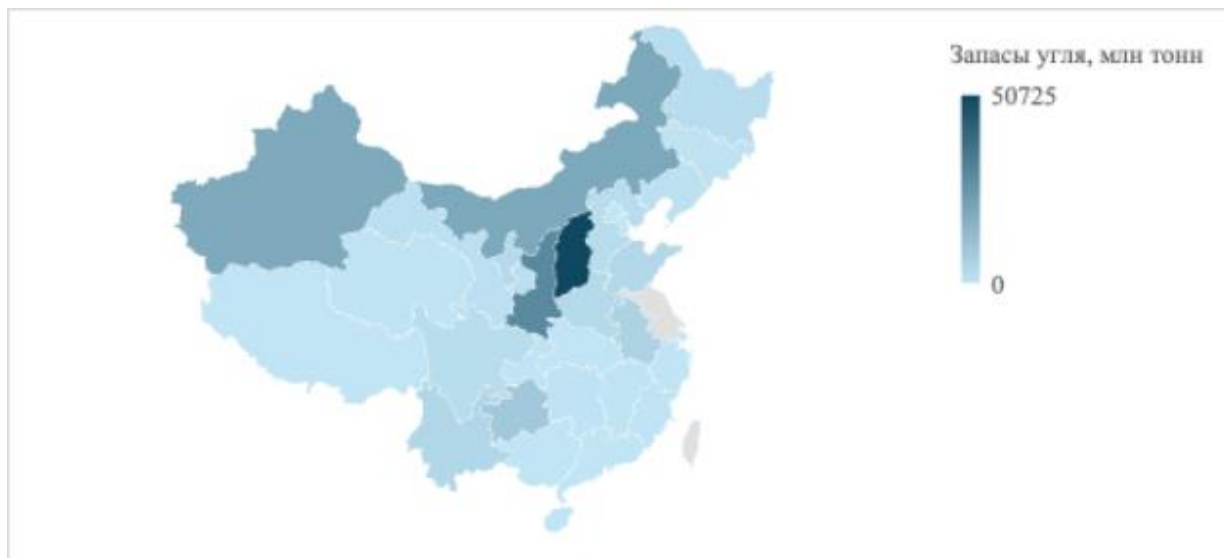


Рисунок 5 — География разведанных запасов угля [38]

Пространственная концентрация добычи в ограниченном числе бассейнов повышает нагрузку на ключевые транспортные коридоры и узловые станции. При этом альтернативные маршруты имеют ограниченную пропускную способность, что снижает степень сетевой избыточности. В условиях роста спроса или временного сокращения добычи в одном из крупных бассейнов диспропорции транслируются на всю систему поставок.

Тем самым география угольных месторождений формирует пространственные параметры производственно-логистической системы: протяжённость транспортного плеча, концентрацию потоков в отдельных узлах и зависимость от магистральной инфраструктуры. Эти характеристики должны учитываться при формализации режимов функционирования внутренней цепи поставок.

Минерально-сырьевая база угля Китая учитывается по категориям, включающим разведанные, балансовые и прогнозные ресурсы [76, 137]. Разведанные запасы отражают геологически изученные объёмы угля, учтённые в государственном балансе. Балансовые запасы представляют собой часть разведанных ресурсов, признанную экономически извлекаемой при текущих технологических и ценовых условиях. Прогнозные ресурсы оцениваются на основе геологических предпосылок и характеризуются неопределённостью условий освоения. По состоянию на конец 2025 г. объём разведанных запасов составил 207,9 млрд т, что практически совпадает с объёмом балансовых запасов (таблица 6).

Таблица 6 — Динамика разведанных и балансовых запасов (2015—2025 гг.) (составлено автором по данным Министерства природных ресурсов КНР, национальной статистики и отраслевых отчётов)

Год	Разведанные запасы, млрд т	Балансовые запасы, млрд т	Изменение к предыдущему периоду, %
2015	115,0	114,5	—
2017	120,5	119,8	+4,6
2019	138,0	136,7	+14,0
2021	162,0	160,5	+17,3
2023	162,3	161,0	+0,2
2025	207,9	207,0	+28,1

Рост запасов после 2019 г. связан преимущественно с вовлечением западных регионов в активную геологоразведку. Однако увеличение разведанных объёмов не означает автоматического расширения текущих производственных мощностей, поскольку освоение новых месторождений требует капитальных вложений, строительства инфраструктуры и времени на ввод в эксплуатацию. Прогнозные ресурсы оцениваются примерно в 700—800 млрд т, что значительно превышает объём разведанных запасов (таблица 7).

Таблица 7 — Классификация угольных запасов Китая по категориям (на конец 2025 г.) (составлено автором по данным отраслевых статистических отчётов)

Категория	Объём, млрд т	Доля в совокупных ресурсах, %
Разведанные	207,9	20,8
Балансовые (извлекаемые)	207,0	20,7
Прогнозные	778,0	77,9
Всего ресурсы	986,0	100

С точки зрения функционирования производственно-логистической системы различие категорий запасов отражает различные временные горизонты формирования предложения. Разведанные и балансовые запасы определяют текущую и среднесрочную границу добычи. Прогнозные ресурсы формируют долгосрочный потенциал расширения, однако их вовлечение сопровождается значительными инвестиционными и инфраструктурными издержками.

Следовательно, классификация запасов задаёт многоуровневую структуру ресурсной базы — краткосрочную, среднесрочную и долгосрочную. Такая временная дифференциация влияет на параметры адаптивности системы и должна учитываться при формализации сценариев изменения добычи.

Минерально-сырьевая база Китая охватывает основные промышленные марки угля, однако их количественное распределение неоднородно. В структуре подтверждённых запасов доминируют энергетические угли, тогда как коксующиеся угли и антрациты представлены в меньших объёмах [54, 66] (таблица 8).

Таблица 8 — Структура угольных запасов Китая по качественным категориям (составлено автором по данным Министерства природных ресурсов КНР и отраслевых обзоров)

Категория угля	Объём запасов, млрд т	Доля в совокупных запасах, %	Основные регионы добычи
Энергетические угли (бурые и каменные)	~145	70,0	Внутренняя Монголия, Синьцзян, Юньнань
Коксующиеся угли	~45	22,0	Шаньси, Хэбэй, Хэнань, Шэньси
Антрациты	~12	6,0	Гуйчжоу, Сычуань, частично Шаньси
Всего	~202	100	—

Энергетические угли составляют около 70—75 % совокупных запасов. Их пространственная концентрация в северных и западных регионах определяет основной объём поставок в электроэнергетический сегмент. Массовый характер данного ресурса формирует устойчивый поток к тепловым электростанциям и определяет высокую долю железнодорожных перевозок по направлению «добывающие регионы — индустриальное побережье».

Коксующиеся угли, доля которых оценивается в 20—25%, характеризуются более высокой территориальной концентрацией и отраслевой специализацией. Основной объём сосредоточен в Шаньси и прилегающих районах, что формирует отдельный поток поставок в металлургический сектор. Ограниченность ресурса и его технологическая специфика обуславливают более высокую чувствительность к колебаниям спроса в сталелитейной промышленности.

Антрациты занимают около 5—7% структуры запасов и используются преимущественно в специализированных сегментах — углехимии и отдельных видах генерации. Небольшой объём и ограниченная география добычи формируют локализованные потоки и меньшую роль в формировании совокупной транспортной нагрузки.

Различия между качественными категориями угля проявляются в формировании параллельных потоков, различающихся по отраслевой направленности и чувствительности к изменениям спроса. Преобладание энергетических углей задаёт масштаб и относительную устойчивость базового потока. Потоки коксующихся углей, напротив, имеют более концентрированный и отраслевой зависимый характер.

Тем самым качественная структура запасов предопределяет многоуровневую конфигурацию угольных потоков и должна учитываться при моделировании распределения добычи между потребителями различных отраслей. В 2015–2025 гг. рост разведанных запасов (расширение геологической базы) сопровождался структурной трансформацией добывающего сектора: сокращение числа шахт говорит о концентрации производства в крупных узлах. Динамика разведанных запасов представлена в таблице 9.

Таблица 9 — Разведанные запасы угля (2017—2025 гг.) (составлено автором по данным Министерства природных ресурсов КНР)

Год	Разведанные запасы, млрд т	Прирост к предыдущему году, %
2017	115,0	—
2018	118,5	+3,0
2019	121,0	+2,1
2020	124,5	+2,9
2021	132,0	+6,0
2022	145,5	+10,2
2023	162,0	+11,3
2024	162,3	+0,2
2025	207,9	+28,1

Рост показателя до 207,9 млрд т к 2025 г. связан преимущественно с вовлечением западных регионов. Однако увеличение разведанных запасов не означает пропорционального роста текущей добычи, поскольку освоение новых месторождений требует инфраструктурного развития и инвестиционных решений.

Параллельно происходила концентрация добычи. Количество шахт сократилось с более чем 10 тыс. в 2017 г. до около 4700 в 2025 г., при одновременном росте средней мощности предприятия (таблица 10).

Таблица 10 — Динамика количества шахт (2017—2025 гг.) (составлено автором по данным CNCA, NBS, IEA)

Год	Количество шахт, ед.	Средняя мощность шахты, млн т/год
2017	10 800	0,35
2019	9 500	0,42
2021	7 200	0,62
2023	5 900	0,78
2025	4 700	1,05

Сокращение числа малых шахт и укрупнение производственных мощностей привели к формированию крупных добывающих кластеров. В 2016—2023 гг. были сформированы национальные угольные базы, сосредоточившие значительную долю совокупной добычи.

Такая трансформация изменяет топологию сети поставок производственно-логистической системы. Сокращение числа производственных узлов при росте их мощности ведёт к концентрации потоков в ограниченном числе точек отправления. Мелкомасштабные колебания при этом сглаживаются, однако зависимость системы от устойчивости крупных добывающих баз возрастает.

Таким образом, минерально-сырьевая база угольной отрасли Китая характеризуется высокой обеспеченностью, выраженной пространственной концентрацией, неоднородностью качественного состава запасов и продолжающимся вовлечением новых ресурсов в промышленную разработку. Эти особенности определяют ресурсные, технологические и пространственные ограничения функционирования производственно-логистической системы,

вливают на конфигурацию потоков, параметры переработки и долгосрочные границы развития угольной компании. Следовательно, при формализации режимов функционирования производственно-логистической системы необходимо учитывать как структуру и качество ресурсной базы, так и динамику вовлечения запасов в промышленное освоение.

1.4 Анализ производственной деятельности угольной компании China Coal

China Coal относится к числу крупнейших государственных угледобывающих корпораций Китая и характеризуется высокой степенью вертикальной интеграции добычи, переработки и распределения продукции. Масштаб её деятельности и территориальная распределённость активов позволяют рассматривать компанию как репрезентативный объект исследования производственно-логистической системы. В период 2015–2025 гг. динамика производственных параметров компании отражала структурные изменения в отрасли, включая укрупнение производственных узлов, перераспределение потоков и изменение режимов загрузки мощностей. Анализ проводится на основе совокупности технико-экономических показателей, характеризующих объёмы добычи, использование мощностей, ресурсную обеспеченность и конфигурацию внутренних потоков. Используемый подход ориентирован на рассмотрение производственно-логистической системы как совокупности взаимосвязанных подсистем добычи, переработки, транспортировки и реализации продукции. При этом показатели анализируются не изолированно, а как параметры режима функционирования, определяющие структуру потоков и ограничения их перераспределения. Полученные результаты формируют эмпирическую основу для последующей параметризации модели производственно-логистической системы и постановки задачи оптимизации. Подразделы 1.4.1–1.4.6 посвящены анализу производственных и логистических параметров функционирования корпорации, используемых при параметризации модели и определении граничных условий оптимизации.

1.4.1 Оценка объёмов и качества выпускаемой продукции China Coal

Объём добычи является базовым параметром производственно-логистической системы корпорации и определяет структуру внутренних потоков. В период 2015—2025 гг. объёмы добычи China Coal варьировались в диапазоне 248—287 млн т в год, что соответствует 5,8—6,8 % национальной добычи (таблица 11).

Таблица 11 — Динамика добычи угля China Coal (2015—2025 гг.) (составлено автором по данным CNCA, NBS, годовых отчётов China Coal (2015—2025), IEA)

Год	Добыча угля, млн т	Доля в национальной добыче, %	Изменение к предыдущему году, %
2015	285,0	6,8	—
2016	276,5	6,6	—3,0
2017	258,0	6,2	—6,7

Продолжение таблицы 11

Год	Добыча угля, млн т	Доля в национальной добыче, %	Изменение к предыдущему году, %
2018	248,0	6,0	—3,9
2019	262,5	6,1	+5,8
2020	271,0	6,0	+3,2
2021	276,0	5,9	+1,8
2022	268,5	5,8	—2,7
2023	287,0	6,0	+6,9
2024	278,0	5,9	—3,1
2025	269,5	5,8	—3,0

Представленные данные свидетельствуют о колебательном характере производственного режима без устойчивого тренда к сокращению или расширению добычи. Изменения годовых объёмов не превышали 7 % в абсолютном выражении, что указывает на ограниченную амплитуду вариативности базового производственного параметра.

Однако для последующего моделирования важны не только объёмы добычи, но и качественные характеристики продукции, поскольку именно они определяют энергетическую эквивалентность потоков и влияют на распределение логистической нагрузки. Соответствующие качественные показатели угля China Coal за 2025 г. приведены в таблице 12.

Таблица 12 — Качественные показатели угля China Coal (2025 г.) составлено автором по данным CNCA, NBS, годовых отчётов China Coal (2015—2025), IEA)

Показатель	China Coal	Среднее по отрасли (КНР)	Примечание
Теплотворная способность энергетического угля, ккал/кг	5000—5200	4700—5000	Выше среднего уровня, востребован на ТЭС восточных провинций
Зольность, %	16—18	18—20	Систематическое улучшение качества за счёт переработки
Содержание серы, %	0,6—0,8	0,8—1,0	Благоприятные геологические условия и селективная добыча
Доля обогащённого угля, %	72	69,7	Выше среднеотраслевого уровня, снижает выбросы при сжигании
Доля коксующегося угля в структуре, %	15—18	13—15	Важный ресурс для металлургии

Тем самым поток угля рассматривается как физический объём, обладающий определённым энергетическим содержанием. Для модели это создаёт возможность перехода от тоннажной метрики к энергетически нормированной величине, повышая сопоставимость потоков различного качества и уточняя параметры транспортной нагрузки.

Объём добычи и качественные характеристики продукции в данном случае выступают базовыми параметрами режима функционирования производственно-логистической системы корпорации и используются как исходные данные для последующей формализации модели.

1.4.2 Анализ производственных мощностей China Coal

Проектная мощность является структурным ограничением производственно-логистической системы и определяет верхнюю границу допустимого объёма добычи. В период 2015—2025 гг. совокупная проектная мощность China Coal варьировалась в диапазоне 285—320 млн т в год (таблица 13), что свидетельствует об относительной стабильности предельного производственного параметра.

Таблица 13 — Динамика проектной мощности и коэффициента её использования (составлено автором по данным *CNCA*, *NBS*, годовых отчётов *China Coal* (2015—2025), *IEA*)

Год	Общая проектная мощность, млн т	Фактическая добыча, млн т	Коэффициент использования мощности, %
2015	310	285	92
2016	305	276	90
2017	295	258	87
2018	285	248	87
2019	285	262	94
2020	295	271	92
2021	300	276	91
2022	305	268	88
2023	315	287	96
2024	320	278	87
2025	320	270	84

Коэффициент использования мощности изменялся в пределах 84—96 %, что отражает вариативность режима загрузки при неизменной проектной базе. Амплитуда колебаний коэффициента не превышала 12 п.п., что указывает на ограниченный диапазон регулирования объёма добычи в рамках существующей инфраструктуры.

Структурные изменения производственной базы проявились в сокращении числа шахт при одновременном росте доли крупных предприятий (таблица 14). Число действующих шахт уменьшилось с 75 до 52, тогда как количество предприятий мощностью более 10 млн т/год увеличилось с 8 до 22.

Таблица 14 — Структура шахт по мощности (2015—2025 гг.) (составлено автором по данным *CNCA*, *NBS*, годовых отчётов *China Coal*)

Год	Количество шахт, ед.	В том числе >10 млн т/год, ед.
2015	75	8
2016	72	9
2017	68	10
2018	64	11
2019	60	12

Продолжение таблицы 14

Год	Количество шахт, ед.	В том числе >10 млн т/год, ед.
2020	59	13
2021	58	15
2022	56	16
2023	55	18
2024	54	20
2025	52	22

Такая трансформация меняет топологию системы: источников потоков становится меньше, тогда как мощность отдельных узлов возрастает. При этом мелкие производственные колебания сглаживаются, а зависимость совокупного объёма добычи от режима функционирования крупных шахт усиливается.

Дополнительным параметром является степень переработки и вертикальной интеграции (таблица 15). Рост доли переработанного угля с 60 % до 72 % отражает увеличение коэффициента предварительной подготовки продукции перед распределением.

Таблица 15 — Показатели переработки и смежных мощностей (2015—2025 гг.) (составлено автором по данным годовых отчётов *China Coal* (2015—2025), *CNCA*)

Год	Количество обогатительных фабрик	Доля переработки, %	Установленная мощность ТЭС, ГВт	Количество «умных» шахт
2015	15	60	6,5	0
2016	15	61	6,7	0
2017	16	63	7,0	2
2018	16	64	7,2	4
2019	17	66	7,5	6
2020	17	67	7,8	8
2021	18	68	8,2	10
2022	18	69	8,6	12
2023	19	70	9,0	15
2024	20	71	9,5	18
2025	21	72	10,0	22

Увеличение установленной мощности собственных ТЭС формирует внутренний контур потребления, что изменяет структуру распределения потоков и сокращает долю внешних поставок. Рост числа автоматизированных шахт свидетельствует об изменении технологического режима функционирования, однако не влияет на предельную мощность, а преимущественно снижает операционную вариативность.

Таким образом, производственные мощности China Coal характеризуются стабильной проектной базой, изменяемым режимом загрузки и концентрацией добычи в крупных узлах. Указанные параметры формируют структурные ограничения и режимные характеристики производственно-логистической системы и используются при последующей формализации модели производственно-логистической системы.

1.4.3 Обоснование системы технико-экономических показателей производственной деятельности компании

Описание производственной деятельности корпорации в рамках последующей формализации производственно-логистической системы должно опираться на согласованный набор технико-экономических показателей, отражающих как масштаб материальных потоков, так и параметры режима функционирования отдельных подсистем. Необходимость такого подхода обусловлена тем, что переход от общего описания деятельности компании к построению математической модели требует использования сопоставимых во времени, количественно интерпретируемых и структурно согласованных характеристик, позволяющих задать исходные данные, ограничения и параметры функционирования системы. В настоящем подразделе система показателей рассматривается как инструмент параметризации, обеспечивающий связь между эмпирическим описанием производственной деятельности корпорации и последующей постановкой задачи исследования производственно-логистической системы.

В основу отбора показателей положено их разделение на две взаимосвязанные группы. Первая группа характеризует масштаб производства и режим загрузки мощностей, то есть отражает количественные параметры функционирования производственного звена и степень использования имеющейся ресурсной базы. Вторая группа описывает свойства продукции и ограничения, связанные с технологическими, экологическими и регуляторными условиями функционирования, тем самым задавая качественные характеристики потоков и допустимые условия их последующего перераспределения в подсистемах переработки, транспортировки и отгрузки. Такое разделение позволяет рассматривать производственную деятельность компании не как совокупность разрозненных показателей, а как систему взаимосвязанных параметров, определяющих режим функционирования производственно-логистической системы в целом.

К количественным индикаторам отнесены объём добычи, производительность труда, себестоимость добычи, операционная маржа и коэффициент использования мощностей. В совокупности они характеризуют соотношение между проектной мощностью и фактическим выпуском, уровень загрузки производственного аппарата, а также изменение удельных затрат и экономико-технологических параметров во времени. Анализ их динамики за 2015–2025 гг. позволяет выявить изменение масштаба производственной деятельности и режимов работы производственного звена, связанных с перераспределением потоков, корректировкой загрузки мощностей и изменением условий функционирования компании. Указанные индикаторы формируют эмпирическую основу для задания диапазонов параметров модели, обоснования сценарных условий и интерпретации результатов вычислительного эксперимента. Динамика количественных индикаторов за 2015–2025 гг. представлена в таблице 16.

Таблица 16 — Динамика количественных показателей деятельности China Coal (2015—2025 гг.)
(составлено автором по данным годовых отчётов *China Coal* (2015—2025), *CNCA*)

Год	Добыча (млн т)	Производительность труда (т/чел·год)	Себестоимость (юань/т)	Операционная маржа (%)	Использование мощностей (%)
2015	170	1500	320	3,0	85
2016	175	1550	330	1,0	80
2017	180	1600	340	1,0	75
2018	180	1400	350	4,0	75
2019	190	1700	300	6,0	80
2020	192	1800	290	8,0	64
2021	202	1900	280	10,0	70
2022	220	2000	270	12,1	75
2023	250	2100	260	11,0	83
2024	261.5	2200	280	10,0	85
2025	269.5	2400	280	3,0	87

При интерпретации данных в таблице 16 принципиально важно разграничивать изменение масштаба и изменение режима функционирования производственного звена. Рост добычи в 2015–2025 гг. отражает изменение уровня выпускного потока, тогда как вариации коэффициента использования мощностей характеризуют изменение режима загрузки при относительно стабильной проектной базе. Показатели производительности труда и себестоимости используются как индикаторы изменения технологических и организационных параметров добычи и подготовки продукции; их динамика служит основой для задания диапазонов параметров при сценарных расчётах.

Качественные показатели вводятся для описания свойств угля и ограничений, влияющих на режимы переработки, транспортировки и потребления. Показатели качества (зольность, содержание серы, теплотворная способность) характеризуют условия эквивалентности потоков при переходе к энергетической метрике и необходимость обогащения. Доля обогащения отражает степень предварительной подготовки продукции и конфигурацию звена «добыча – переработка».

Показатели промышленной безопасности рассматриваются как ограничения режимов функционирования системы, поскольку требования по безопасности и уровень аварийности влияют на эксплуатацию оборудования, темпы добычи и допустимые технологические режимы. Экологические параметры, отражающие удельные выбросы, характеризуют регуляторные условия, влияющие на технологические решения, структуру затрат и режимы эксплуатации оборудования. Сводная динамика указанных показателей представлена в таблице 17.

Значения качественных индикаторов, приведённые в таблице 17, интерпретируются как ориентировочные и используются прежде всего для фиксации направленности и порядка изменений во времени. В дальнейшем при построении модели важным является не абсолютный уровень каждого показателя, а согласованность тенденций: снижение зольности и содержания

серы при росте доли обогащения означает изменение структуры подготовки продукции, а рост теплотворной способности указывает на возможность сопоставления потоков по энергетическому содержанию, что уменьшает искажения при транспортно-логистических расчётах, основанных только на тоннаже.

Таблица 17 — Качественные показатели деятельности China Coal (2015—2025 гг.) (составлено автором по данным годовых отчётов *China Coal* (2015—2025), *CNCA*)

Год	Зольность (%)	Сера (%)	Низшая теплота сгорания (ккал/кг)	Доля обогащения (%)	Смертность (чел./млн т)	Интенсивность выбросов CO ₂ (т/т)
2015	20,0	1,30	5000	70	0,10	0,300
2016	19,0	1,25	5050	72	0,09	0,295
2017	18,0	1,20	5200	75	0,07	0,290
2018	17,0	1,15	5250	78	0,06	0,285
2019	16,0	1,10	5300	80	0,04	0,280
2020	15,0	1,10	5400	85	0,01	0,270
2021	14,0	1,05	5450	88	0,01	0,265
2022	14,0	1,05	5500	90	<0,01	0,260
2023	13,0	1,02	5550	92	<0,01	0,255
2024	12,5	1,01	5580	94	<0,01	0,252
2025	12,0	1,00	5600	95	<0,01	0,250

Показатели безопасности и удельных выбросов, в свою очередь, рассматриваются как параметры ограничений режима, поскольку их изменение связано с изменением требований к эксплуатации и технологическому обеспечению процесса добычи и переработки.

Для исключения дублирования и обеспечения сопоставимости показателей, относящихся к ограничениям режима, параметры промышленной безопасности и экологичности дополнительно агрегированы в таблице 18. Данная таблица используется как компактная форма представления динамики ограничительных характеристик, которые далее могут быть введены в модель через сценарные рамки или через параметры допустимых режимов функционирования.

Тем самым система показателей, представленная в таблицах 16–18, обеспечивает согласованное описание производственной деятельности China Coal как производственно-логистической системы: количественные индикаторы характеризуют масштаб и режим загрузки, а качественные — свойства продукции и ограничения режима функционирования. В последующих подразделах эти показатели используются для параметризации модели и задания эмпирически обоснованных диапазонов её параметров.

Таблица 18 — Динамика показателей промышленной безопасности и экологичности China Coal (составлено автором по данным годовых отчётов *China Coal* (2015—2025), *CNCA*)

Год	Коэффициент смертельного травматизма, чел./млн т	Удельные выбросы CO ₂ -эквивалента, тонны на тонну угля	Примечания
2015	0,100	0,300	Высокий травматизм, слабая утилизация метана
2016	0,090	0,295	Начало улучшений
2017	0,070	0,290	Снижение аварийности
2018	0,060	0,285	Программы безопасности
2019	0,040	0,280	Систематическая модернизация
2020	0,012	0,270	Достигнут мировой уровень безопасности
2021	0,010	0,265	Роботизация, контроль метана
2022	<0,010	0,260	Отдельные годы без смертельных аварий
2023	<0,010	0,255	Минимум по выбросам за десятилетие
2024	<0,010	0,252	Стабилизация
2025	<0,010	0,250	Уменьшение углерод ёмкости на ~15%

1.4.4 Анализ организационной структуры угольной компании Китая

На рисунке 6 представлена организационная структура China Coal Group, отражающая взаимосвязь центрального аппарата управления и основных дочерних компаний по ключевым направлениям деятельности.

Центральный аппарат включает функциональные департаменты, обеспечивающие стратегическое планирование, финансово-инвестиционное управление и координацию операционной деятельности. Дочерние компании сгруппированы по основным направлениям, включая угледобычу, строительство, производство оборудования, углехимию, управление активами и финансовые сервисы. Каждая из них координирует соответствующие производственные единицы, формируя единый управляемый контур холдинга.

Трансформация угольной промышленности Китая в 2015—2025 гг. сопровождалась изменением принципов управления: наряду с государственными квотами и регуляторными рамками возрастает значение адаптации производственно-логистической системы к рыночному спросу, транспортным ограничениям и требованиям к качеству продукции. В этих условиях управление корпорацией ориентировано на выполнение производственных планов при одновременном согласовании потоков между добычей, переработкой, транспортировкой и сбытом в изменяющейся внешней среде.

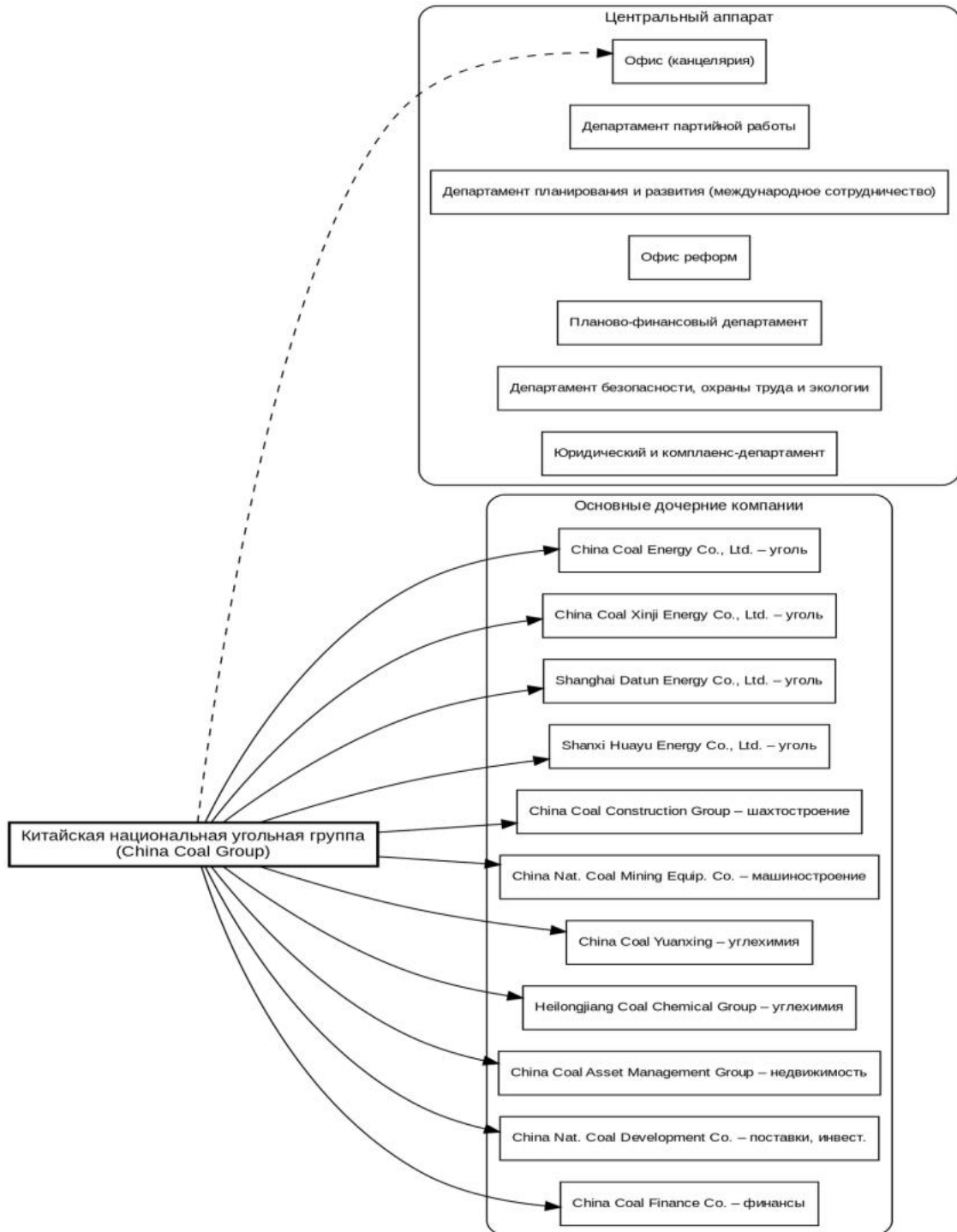


Рисунок 6 — Организационная структура China Coal Group (составлено автором)

China Coal — открытая социально-экономическая система, взаимодействующая с внешними субъектами (поставщиками оборудования, транспортными организациями, финансовыми институтами и регулируемыми органами). Такая конфигурация повышает роль информационного обеспечения и оперативной координации материальных и финансовых потоков, что обуславливает переход от исключительно иерархической модели к гибридной системе управления, сочетающей вертикальную подчинённость с горизонтальным согласованием между звеньями производственно-логистической системы.

С позиции системного анализа внутренняя производственно-логистическая система корпорации может быть представлена в виде трёхуровневого функционального контура [64, 88] (рисунок 7):

- стратегический уровень — постановка долгосрочных целей и приоритетов производства, сбыта и инвестиций;
- координационный уровень — согласование планов, распределение ресурсов и предотвращение рассогласований между звеньями «добыча — обогащение — сбыт»;
- операционный уровень — выполнение производственных и логистических операций и передача данных о результатах вверх по иерархии.



Рисунок 7 — Башенная функциональная структура управления внутренней производственно-логистической системой (составлено автором)

Между уровнями управления формируется замкнутый контур «решение — исполнение — обратная связь», обеспечивающий управляемость системы в условиях территориальной удалённости активов друг от друга. На стратегическом уровне концентрируется информация о спросе, запасах и транспортных возможностях, что позволяет корректировать производственные программы и инвестиционные решения. Координационный уровень обеспечивает согласование потоков между подразделениями и снижает риск несоответствия по объёмам, срокам и качеству поставок. На операционном уровне реализуются производственные задания, фиксируются фактические параметры выпуска и логистики, а также формируется первичная информация для последующей управленческой обратной связи.

Структура управления China Coal образует институциональную и информационную основу функционирования внутренней производственно-логистической системы. Стратегическое управление, координация и операционная реализация в данном случае выступают как единый контур согласования потоков. Данная функциональная модель имеет методологическое значение для последующей формализации производственно-логистической

системы и построения математической модели оптимизации потоков и критериев эффективности, представленных в главе 3.

1.5 Постановка задачи диссертационного исследования

Проведённый в первой главе анализ показал, что производственно-логистические процессы угольной компании Китая протекают в условиях сложной многоуровневой организации, в которой процессы добычи, переработки, хранения, транспортировки и отгрузки угольной продукции образуют взаимосвязанную систему потоков. Функционирование такой системы определяется не только масштабами добычи и объёмами переработки, но и качественными характеристиками сырья и продукции, состоянием запасов, ограничениями по мощностям и пропускной способности, а также необходимостью устойчивого выполнения объёмно-качественных требований потребителей.

Для исследуемого объекта существенное значение имеют параметрическая вариативность режимов функционирования, территориальная удалённость производственных звеньев друг от друга, технологическая зависимость результатов переработки от параметров входного сырья и временная поэтапная связанность запасов. Совокупность указанных факторов не позволяет ограничиться локальным рассмотрением отдельных процессов и обуславливает необходимость применения методов системного анализа, формализации и моделирования производственно-логистической системы угольной компании как сложной системы.

Научная задача исследования состоит в разработке методов системного исследования производственно-логистических процессов угольной компании Китая как сложной системы и в построении математической модели, обеспечивающей описание, формализацию, анализ и обоснование согласованных и сбалансированных режимов её функционирования в условиях параметрической неопределённости и структурных ограничений. Объектом исследования является производственно-логистическая система угольной компании Китая, охватывающая процессы добычи угля, его переработки, хранения, транспортировки и отгрузки потребителям.

Предметом исследования являются методы системного анализа, моделирования и многокритериальной оптимизации сложных систем, применяемые для описания, формализации, анализа и обоснования режимов функционирования производственно-логистической системы угольной компании Китая в условиях параметрической неопределённости и структурных ограничений.

Цель диссертационного исследования заключается в разработке научно обоснованных подходов, методов, моделей и практических рекомендаций по исследованию и совершенствованию производственно-логистических процессов угольной компании Китая в

условиях неопределённости на основе применения методов системного анализа, моделирования сложных систем и многокритериальной оптимизации.

Идея диссертационного исследования состоит в использовании методов системного анализа, моделирования сложных систем и многокритериальной оптимизации для описания, формализации и исследования производственно-логистических процессов угольной компании Китая как сложной системы и для обоснования согласованных и сбалансированных режимов её функционирования в условиях параметрической неопределённости на основе исходных данных компании China Coal.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие основные задачи:

1. Провести системный анализ состояния и тенденций развития угольной отрасли Китая, компании China Coal, а также определить её место и роль в минерально-сырьевом комплексе страны.

2. Выполнить оценку производственно-логистических процессов угольной компании как процессов, протекающих в сложной системе, и выявить основные структурные связи, ограничения и особенности взаимодействия её подсистем.

3. Разработать математическую модель функционирования производственно-логистической системы компании и исследовать взаимосвязи между её основными подсистемами и выходными параметрами в различных режимах.

4. Обосновать систему показателей оценки функционирования угольной компании и разработать многокритериальную постановку задачи, предусматривающую совместный учёт интегрального показателя ресурсной результативности и показателя логистической устойчивости и выполнения заказов потребителей.

5. Осуществить планирование вычислительного эксперимента, провести вычислительный эксперимент и анализ его результатов, выделить множество Парето-оптимальных решений, обосновать выбор рационального сбалансированного режима функционирования и разработать практические рекомендации по совершенствованию производственно-логистических процессов компании China Coal.

Методологической основой исследования являются положения общей теории систем, системного анализа, методы моделирования сложных систем, статистического прогнозирования и принятия решений в условиях неопределённости. В работе угольная компания Китая рассматривается как сложная многоуровневая иерархическая производственно-логистическая система, в которой процессы добычи, переработки, транспортировки, хранения и отгрузки угольной продукции находятся во взаимосвязи и подлежат совместному анализу с учётом

структурных ограничений, параметрической вариативности и необходимости согласования режимов функционирования.

1.6 Выводы по первой главе

Проведённый в первой главе анализ состояния внутреннего угольного рынка Китая и производственной деятельности корпорации China Coal за период 2015–2025 гг. позволил установить ключевые структурные и параметрические особенности функционирования исследуемой производственно-логистической системы.

Установлено, что развитие угольной отрасли Китая происходит при сохранении значительных объёмов добычи и одновременном усилении инфраструктурных, ресурсных и экологических ограничений. Пространственная асимметрия размещения добычи и потребления, колебания внутреннего спроса и регулирование производственных мощностей формируют условия параметрической вариативности, проявляющейся в изменении допустимых режимов функционирования производственно-логистической системы.

Анализ технико-экономических параметров China Coal показал изменение масштабов добычи и переработки, перераспределение стоимостных характеристик и динамику загрузки производственного потенциала. Полученные результаты свидетельствуют о том, что функционирование производственно-логистической системы определяется согласованностью объёмных, качественных, технологических и рыночных параметров, а изменение условий в одном звене отражается на режимах работы сопряжённых подсистем.

Установлено, что изменение качественных характеристик угольной продукции, включая рост доли обогащения, снижение зольности и содержания серы, а также повышение теплотворной способности, отражает изменение технологической конфигурации звена «добыча – переработка». Повышение степени предварительной подготовки продукции внутри корпорации указывает на более тесную увязку материальных потоков и перераспределение нагрузок между подсистемами добычи, переработки и отгрузки в составе производственно-логистической системы.

В совокупности полученные результаты позволяют рассматривать производственно-логистическую систему China Coal как сложную многоуровневую систему взаимосвязанных потоков, для которой характерны структурная связность подсистем, наличие конфликтующих параметров управления и действие ограничений по мощностям, качественным характеристикам продукции и структуре спроса.

Таким образом, в первой главе сформирована аналитическая основа дальнейшего исследования производственно-логистической системы угольной компании Китая. Выявленные структурные зависимости, ограничения и проявления параметрической вариативности

подтверждают необходимость перехода к обоснованию методов оценки состояния, прогнозирования развития и последующей формализации объекта в виде динамической многокритериальной системы.

ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УГОЛЬНОЙ КОМПАНИИ КИТАЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Во второй главе осуществляется переход от анализа структурных особенностей и ограничений функционирования угольной отрасли к формированию формализованной методической базы исследования. Если в первой главе были выявлены источники параметрической вариативности и институциональные границы функционирования системы, то во второй главе данные особенности переводятся в систему переменных, ограничений и динамических зависимостей, пригодных для математического моделирования.

Методологическая задача главы состоит в обосновании динамической многокритериальной постановки задачи исследования производственно-логистической системы угольной компании и в разработке инструментария, обеспечивающего её формализацию как многоуровневой системы потоков с временной поэтапной связанностью состояний и решений. В связи с этим, в главе раскрываются ограничения однокритериальных подходов, уточняется роль состояния системы и источников параметрической вариативности, выполняется структурная диагностика топологии сети, а также формируется эмпирическая и сценарная база параметров, необходимая для последующего построения динамической многокритериальной модели.

Во второй главе тем самым закладывается методическая основа для построения и вычислительной реализации динамической многокритериальной модели, представленной в последующих главах.

2.1 Оценка существующих методов оптимизации внутренних цепей поставок в угольной отрасли

В последние десятилетия оптимизация цепей поставок рассматривается как одно из ключевых направлений исследования производственных и логистических систем промышленных предприятий, поскольку она связана с координацией потоков сырья, материалов, полуфабрикатов и готовой продукции в условиях ограниченности ресурсов, неоднородности спроса и необходимости соблюдения технологических ограничений. В научной литературе управление цепями поставок трактуется как интегрированный подход к планированию, организации и контролю потоковых процессов, ориентированный на снижение совокупных издержек, повышение результативности функционирования системы и обеспечение требуемого уровня обслуживания потребителей [87].

Для решения задач такого класса традиционно применяются методы линейного, смешанного целочисленного и стохастического программирования, а также интегрированные модели планирования производства, распределения и транспортировки [72, 117]. Указанные

подходы ориентированы, как правило, на минимизацию совокупных затрат или максимизацию прибыли при фиксированных параметрах спроса, предложения и технологических ограничений. Их применение позволяет получать формализованные решения в пределах заданных условий, однако в большинстве случаев такие решения строятся в рамках однокритериальной постановки.

Проведённый анализ показывает, что существующие методы оптимизации цепей поставок обладают значительным потенциалом для исследования производственно-логистических систем, однако их применимость к угольной отрасли имеет ряд ограничений. Для крупных угольных компаний характерна сложная структура внутренних связей между добычей, переработкой, транспортировкой, хранением и отгрузкой продукции. В таких условиях параметры отдельных звеньев не могут рассматриваться изолированно, поскольку изменение режима функционирования одного элемента системы влияет на работу сопряжённых подсистем.

В работах, посвящённых моделированию цепей поставок в угольной промышленности, показана структурная и динамическая сложность таких систем, а также необходимость учёта взаимодействия между добычей, транспортом, переработкой и сбытом [72]. Так, подходы, основанные на объектно-ориентированных сетях Петри, позволяют описывать потоки и режимы работы логистических узлов, однако их применение остаётся ограниченным в части интеграции многокритериальных целей и адаптации к изменению внешних условий. Особенно это проявляется в случаях, когда в состав критериев необходимо включать показатели качества продукции и степень выполнения требований потребителей, вступающие в противоречие с чисто экономическими целями.

В отдельных исследованиях предпринята попытка перехода к многокритериальной оптимизации угольных цепей поставок, при которой одновременно учитываются прибыль предприятия и характеристики обслуживания потребителей [100]. В подобных работах используется, в частности, ϵ -constraint-метод, позволяющий строить Парето-допустимые стратегии и анализировать компромиссы между конфликтующими целями. Вместе с тем такие исследования пока носят единичный характер и не образуют устойчивой методической основы для исследования производственно-логистических систем крупных угольных компаний, функционирующих в условиях изменчивости спроса, неоднородности качества продукции и инфраструктурных ограничений.

Более общие исследования по многокритериальной оптимизации подтверждают, что модели с единственной целевой функцией не позволяют в полной мере учитывать комплексный характер реальных логистических систем. В этой связи, всё большее распространение получают подходы, ориентированные на совместный учёт экономических, экологических и социальных параметров устойчивости систем управления цепями поставок [12, 52]. Однако даже в таких работах основное внимание, как правило, сосредоточено на универсальных инженерных схемах

без достаточного учёта отраслевой специфики угольных компаний, для которых существенное значение имеют технологические ограничения, качественные характеристики продукции и территориальная удалённость производственных звеньев друг от друга.

Таким образом, при значительном развитии методов оптимизации цепей поставок сохраняются ограничения, имеющие принципиальное значение для угольной отрасли. Во-первых, большинство существующих моделей сохраняет статический характер и не позволяет в полной мере учитывать динамику запасов, сезонную изменчивость спроса и влияние инфраструктурных ограничений [15, 19]. Во-вторых, в большинстве исследований преобладает ориентация на однокритериальные постановки задачи, связанные с минимизацией затрат или максимизацией прибыли [19, 93], которая не отражает объективного конфликта между объёмными, качественными и логистическими параметрами функционирования производственно-логистической системы [81, 93]. В-третьих, даже в многокритериальных постановках, представленных в научной литературе, недостаточно разработан вопрос согласования таких параметров во времени и построения формализованного механизма выбора сбалансированного режима функционирования системы [53].

Наименее разработанным направлением остаётся формализованное описание производственно-логистических систем крупных государственных угольных компаний как динамических многоуровневых систем потоков, функционирующих в условиях параметрической вариативности [84, 128]. В научной литературе отсутствует комплексная математическая модель исследования производственно-логистической системы угольной компании, обеспечивающая одновременный учёт динамики добычи, переработки и накопления запасов, влияния качественных характеристик продукции на структуру допустимых режимов функционирования и построение множества Парето-оптимальных решений без предварительного сведения задачи к одному критерию [16, 35, 134].

Следовательно, существующие методы оптимизации внутренних цепей поставок в угольной отрасли создают необходимую методическую базу, однако не обеспечивают в полной мере решения задач системного исследования и многокритериального согласования режимов функционирования производственно-логистической системы крупной угольной компании. Данное обстоятельство обуславливает необходимость дальнейшего обоснования методологических основ оптимизации таких систем применительно к условиям угольной промышленности Китая.

2.2 Оценка особенностей и обоснование методологических основ оптимизации внутренних цепей поставок в угольной промышленности Китая

Проведённая в предыдущем подразделе оценка существующих методов оптимизации внутренних цепей поставок в угольной отрасли показала, что их применение к производственно-логистической системе крупной угольной компании связано с рядом методических ограничений. Прежде всего, это относится к преобладанию статических и однокритериальных постановок, которые не позволяют в полной мере учитывать структурную сложность исследуемого объекта, временную поэтапную связанность его параметров и конфликтный характер управленческих требований.

В связи с этим возникает необходимость перехода от общей оценки существующих методов к рассмотрению особенностей производственно-логистической системы угольной компании Китая как объекта оптимизации и к обоснованию методологических положений, лежащих в основе её дальнейшего моделирования. Такой переход предполагает учёт отраслевой специфики исследуемого объекта, включая взаимосвязанность процессов добычи, переработки, транспортировки, хранения и отгрузки продукции, параметрическую вариативность режимов функционирования, а также ограничения по мощностям, качественным характеристикам продукции и структуре спроса.

Настоящий раздел посвящён анализу указанных особенностей и обоснованию методологических подходов к оптимизации производственно-логистической системы угольной компании. В нём последовательно рассматриваются ограниченность однокритериальных моделей управления цепями поставок (п. 2.2.1), необходимость динамического описания производственно-логистических систем в угольной отрасли (п. 2.2.2), а также обоснование и выбор алгоритма многокритериальной оптимизации внутренних цепей поставок в угольной промышленности (п. 2.2.3).

2.2.1 Ограниченность однокритериальных моделей управления цепями поставок

Управление цепями поставок (SCM) в классическом определении рассматривается как интегрированный подход к планированию и координации потоков материальных, информационных и финансовых ресурсов в условиях ресурсных ограничений и неоднородности спроса с целью повышения совокупной эффективности функционирования системы [136]. В практике прикладных исследований оптимизация логистических сетей традиционно формулируется как оптимизационная задача с единственной целевой функцией — минимизацией совокупных затрат либо максимизацией прибыли при фиксированных параметрах спроса, предложения и технологических ограничений [110].

Подобные модели, основанные на линейном, смешано-целочисленном или стохастическом программировании, позволяют получить формально оптимальное решение в рамках заданного критерия. Однако при применении к сложным производственно-логистическим системам они приводят к методологическому сужению допустимой области режимов функционирования, поскольку сводят многомерную структуру целей к единственной скалярной функции.

Во-первых, однокритериальная постановка принципиально не отражает объективно существующие конфликты между подсистемами. В реальных цепях поставок, объединяющих добычу, переработку, транспортировку и сбыт, одновременно возникают требования минимизации издержек, обеспечения требуемого качества продукции, поддержания устойчивости логистических режимов и соблюдения экологических нормативов. Усиление одного параметра (например, увеличение объёмов добычи для снижения удельной себестоимости) способно привести к перегрузке транспортной инфраструктуры, росту запасов или ухудшению качественных характеристик продукции.

Таким образом, система характеризуется внутренне противоречивой структурой целей, которая не может быть адекватно представлена в виде единственной функции оптимальности. Необходимость учета конфликтующих критериев подтверждается современными исследованиями в области многокритериальной оптимизации цепей поставок [52].

Во-вторых, попытки учёта нескольких аспектов эффективности посредством взвешенного агрегирования приводят к формальному сведению многокритериальной задачи к однокритериальной. Такое преобразование предполагает предварительное задание приоритетов критериев без анализа структуры их конфликта. В результате оптимизационная процедура фиксирует единственное решение, соответствующее выбранной системе весов, но не раскрывает допустимое множество компромиссных режимов функционирования.

Для производственно-логистических систем угольных компаний данное противоречие проявляется особенно отчётливо, поскольку рост производственной нагрузки на добывающие и перерабатывающие звенья не всегда сопровождается улучшением параметров поставок и качества продукции. Напротив, повышение объёмов добычи при фиксированных мощностях переработки, транспортировки и хранения может приводить к накоплению запасов, перераспределению потоков по менее эффективным направлениям и снижению устойчивости выполнения заказов [1, 2].

С методологической точки зрения это означает потерю информации о структуре Парето-допустимых решений и ограничение возможности управленческого выбора. Для сложных инженерных систем, где параметры взаимосвязаны и обладают различной степенью чувствительности, подобная редукция оказывается недостаточной.

Кроме того, в условиях сложной производственно-логистической системы однокритериальная постановка затрудняет содержательную интерпретацию получаемых решений. При сведении разнонаправленных требований к одному интегральному показателю становится затруднительным определить, за счёт каких именно изменений в добыче, переработке, транспортировке, запасах или качестве продукции достигается формально оптимальное значение целевой функции. В результате снижается возможность использования таких моделей в качестве инструмента обоснования согласованных управленческих решений.

Следовательно, использование однокритериальных моделей в задачах управления производственно-логистическими системами крупных угольных компаний приводит к методологическому ограничению пространства решений и не обеспечивает формализации объективно существующих конфликтов между экономическими, производственными и логистическими параметрами.

Тем самым ограниченность однокритериальных моделей проявляется не только в неполноте формализованного описания целей, но и в невозможности исследовать допустимые компромиссные режимы функционирования производственно-логистической системы.

Однако переход к многокритериальной постановке сам по себе ещё не решает всей задачи. Существенным остаётся учёт временной поэтапной изменчивости параметров функционирования системы, что рассматривается в следующем подразделе.

2.2.2 Необходимость динамического описания производственно-логистических систем

Даже переход к многокритериальной постановке задачи не устраняет полностью методологические ограничения традиционных моделей управления цепями поставок. Существенным недостатком большинства классических оптимизационных подходов остаётся их статический характер, при котором параметры спроса, предложения, производственных мощностей и логистических ограничений рассматриваются как фиксированные в пределах анализируемого периода [61].

Между тем реальное функционирование производственно-логистических систем определяется изменением параметров во времени. Объёмы спроса, рыночные цены, доступность ресурсов, пропускная способность инфраструктуры и уровень запасов не остаются постоянными, а изменяются по периодам, формируя динамическую среду принятия решений. В современных исследованиях подчёркивается, что производственно-логистические системы характеризуются высокой изменчивостью условий функционирования и требуют адаптации к колебаниям рынка и инфраструктурным ограничениям [36, 48].

Для угольной отрасли данное обстоятельство имеет принципиальное значение. Производственно-логистическая система угольной компании включает взаимосвязанные

процессы добычи, переработки, хранения, транспортировки и отгрузки продукции, причём результаты функционирования каждого из этих звеньев зависят не только от текущих условий, но и от состояния системы, сформированного в предшествующие периоды [40]. Сезонные колебания спроса на энергетический уголь, изменения экспортной конъюнктуры, ограничения пропускной способности железнодорожной и портовой инфраструктуры, а также накопление и использование запасов образуют единый процесс, развёрнутый во времени. [45].

Именно поэтому решение, признанное допустимым или эффективным в одном периоде, не может рассматриваться изолированно от последующих периодов. Увеличение объёмов добычи в текущем периоде при ограниченной пропускной способности транспорта или переработки способно привести к накоплению запасов, перегрузке отдельных узлов системы и изменению структуры допустимых решений в дальнейшем. Аналогично, снижение переработки или перераспределение потоков в одном звене отражается на возможности выполнения заказов и на уровне загрузки сопряжённых подсистем в последующие периоды.

С точки зрения системного анализа это означает, что производственно-логистическая система угольной компании должна рассматриваться как динамическая система с внутренними состояниями. К числу таких состояний относятся, прежде всего, запасы, загрузка производственных мощностей, использование транспортной инфраструктуры и доступные параметры переработки. Эти состояния изменяются по периодам и выступают связующим элементом между текущими решениями и последующими режимами функционирования системы. Игнорирование такой временной поэтапной связанности приводит к получению локально допустимых решений, которые не обеспечивают устойчивости системы на всём горизонте планирования.

Дополнительный аргумент в пользу динамического описания связан с учетом неопределённости. При изменчивости внешних и внутренних параметров статические решения оказываются чувствительными к отклонениям исходных данных и хуже приспособлены к адаптации в изменяющихся условиях [70]. Напротив, включение временной структуры и сценарных изменений параметров позволяет учитывать эволюцию состояния системы и формировать более устойчивые режимы её функционирования [45].

Таким образом, статическая постановка задачи, даже при учёте нескольких критериев, не обеспечивает адекватного описания производственно-логистической системы угольной компании, поскольку не отражает развитие её состояний во времени и влияние текущих решений на последующие параметры функционирования. Для исследования таких систем требуется динамическая постановка, в которой учитываются последовательность периодов, временная поэтапная связанность запасов, изменение загрузки мощностей и влияние решений предыдущего периода на условия функционирования в следующем.

Следовательно, переход к динамическому описанию является методологически необходимым этапом исследования производственно-логистических систем в угольной отрасли. Именно такая постановка создаёт основу для последующего выбора методов многокритериальной оптимизации, способных учитывать не только конфликт целей, но и развитие системы во времени.

2.2.3 Обоснование и выбор алгоритма многокритериальной оптимизации внутренних цепей поставок в угольной промышленности

Переход к многокритериальной и динамической постановке задачи управления производственно-логистической системой угольной компании требует не только формализации целевых функций и ограничений, но и выбора такого вычислительного механизма, который был бы способен работать со сложной структурой допустимой области, учитывать временную поэтапную связанность решений и строить множество Парето-оптимальных альтернатив. В данном случае предметом оптимизации выступает не единичное решение, а совокупность допустимых компромиссных режимов, отражающих структуру конфликта критериев и позволяющих осуществлять последующее согласование управленческих приоритетов без предварительного сведения задачи к одному критерию [9, 110].

Необходимость такого подхода обусловлена особенностями самого объекта исследования. Производственно-логистическая система угольной компании представляет собой динамическую систему потоков и состояний, в которой решения, принимаемые в периоде t , изменяют состояние системы в периоде $t+1$ через запасы, доступные мощности, параметры переработки, качественные характеристики продукции и загрузку логистических узлов. Следовательно, задача оптимизации должна учитывать не только конфликт критериев, но и развитие системы во времени. Именно связка «решение \rightarrow состояние \rightarrow последующее решение» формирует сложную структуру допустимой области решений, характеризующуюся временной поэтапной связанностью и множественностью допустимых компромиссных режимов функционирования системы.

В этих условиях применение классических методов, ориентированных на единственный интегральный критерий, оказывается ограниченным. При использовании весовой свёртки или иных способов предварительного сведения задачи к одному критерию структура конфликта критериев фактически задаётся до начала расчёта, а исследование допустимого множества компромиссных режимов функционирования системы подменяется поиском решения, соответствующего заранее установленной системе приоритетов [52, 110]. Такой подход приводит к потере информации о структуре допустимой области решений и о характере взаимного изменения критериев при переходе от одного режима к другому.

Для производственно-логистической системы угольной компании это имеет принципиальное значение, поскольку в ней необходимо одновременно учитывать ресурсную результативность функционирования, устойчивость выполнения заказов, требования к качеству продукции, ограничения по мощностям и параметры загрузки внутренних звеньев системы. Сведение этих требований к единственной скалярной функции затрудняет содержательную интерпретацию получаемого решения и не позволяет выявить множество допустимых режимов, различающихся по структуре компромисса между критериями.

Следовательно, методологически оправданным является переход к построению множества Парето-оптимальных решений, а не к поиску одной точки экстремума. Обзорные исследования показывают, что рост интереса к многокритериальной оптимизации в задачах SCM связан именно с необходимостью совместного учёта экономических, сервисных и экологических параметров эффективности [94–96]. В прикладных моделях угольных цепей поставок также показано, что выполнение требований потребителей формирует самостоятельное измерение эффективности и не сводится без потерь к денежной целевой функции [87]. Это означает, что для внутренней цепи поставок угольной компании требуется такой вычислительный подход, который сохраняет информацию о множестве допустимых компромиссных решений и делает возможным последующий выбор согласованного и сбалансированного режима функционирования системы.

Исходя из указанных требований, в настоящем исследовании обоснован выбор эволюционного алгоритма NSGA-II как вычислительной процедуры, соответствующей структуре динамической задачи многокритериальной оптимизации. Во-первых, NSGA-II ориентирован на прямое построение множества Парето-оптимальных решений без предварительного задания весов критериев и обеспечивает сохранение разнообразия допустимых альтернатив [28]. Во-вторых, алгоритм эффективен при высокой размерности пространства решений, наличии нелинейных ограничений и смешанном характере переменных, что характерно для динамических производственно-логистических систем [28]. В-третьих, популяционная природа алгоритма позволяет исследовать конфигурацию допустимой области и анализировать компромиссы между критериями без предварительной их редукции [28, 52, 110].

Дополнительным аргументом в пользу выбора NSGA-II является его применимость к задачам, в которых требуется не только построение фронта Парето, но и анализ формы допустимой области решений. Для производственно-логистической системы угольной компании это позволяет перейти от формального поиска экстремума к исследованию конфигурации допустимых режимов функционирования, а затем — к выбору сбалансированного режима с учётом структуры ограничений и управленческих приоритетов.

Важно подчеркнуть, что выбор NSGA-II обусловлен не универсальностью алгоритма как такового, а соответствием его вычислительных свойств структуре исследуемой модели: необходимостью построения множества Парето-оптимальных решений, учётом временной поэтапной связанности состояний системы и сохранением информации о конфигурации допустимой области режимов функционирования. Тем самым NSGA-II обеспечивает структурно согласованный и вычислительно реализуемый переход от системной характеристики объекта к количественной реализации динамической многокритериальной оптимизации производственно-логистической системы.

2.3 Оценка влияния параметрической неопределенности и вариативности на процессы функционирования производственно-логистической системы в угольной промышленности

Построение динамической модели производственно-логистической системы требует выявления и формализации источников параметрической вариативности как системного свойства исследуемого объекта. В рамках настоящего исследования параметрическая вариативность трактуется не как случайное отклонение отдельных показателей, а как изменение во времени совокупности внешних воздействий и внутренних условий функционирования системы, приводящее к трансформации допустимых режимов движения потоков.

Производственно-логистическая система угольной компании формализуется как динамическая система, в которой управленческие решения периода t определяют состояние системы в периоде $t+1$. Состояние системы при этом характеризуется совокупностью накопленных запасов, уровнем загрузки производственных мощностей, доступностью инфраструктурных ресурсов и качественными характеристиками товарного потока. Такая временная поэтапная связанность означает, что изменение любого из указанных параметров воздействует не только на текущий режим функционирования, но и на допустимые режимы последующих периодов.

Производственные объёмы, параметры переработки, качество угольной продукции, транспортные ограничения и структура спроса изменяются во времени под воздействием технологических, ресурсных и рыночных факторов. Эти изменения носят системный характер: колебания объёмов добычи влияют на загрузку обогатительных мощностей; изменение доли переработки влияет на структуру товарных потоков; инфраструктурные ограничения перераспределяют направления отгрузки; динамика спроса формирует необходимость корректировки режимов производства. Таким образом, вариативность проявляется не на уровне отдельных показателей, а в изменении конфигурации всей производственно-логистической системы.

Системный смысл параметрической вариативности заключается в том, что допустимая область решений в каждый момент времени определяется не только текущими значениями параметров, но и накопленным состоянием системы. Это делает задачу оптимизации исторически зависимой и требует динамического описания переходов состояния. Игнорирование вариативности приводит к искусственному сужению пространства решений и искажению структуры Парето-оптимальных режимов функционирования.

В рамках настоящего раздела источники параметрической вариативности рассматриваются по четырём основным группам: производственные факторы, вариативность качественных характеристик продукции, инфраструктурные ограничения, а также факторы, связанные с условиями спроса и реализации продукции. Их анализ обеспечивает переход от качественного описания функционирования производственно-логистической системы к количественной параметризации динамической многокритериальной модели.

Одним из ключевых источников параметрической изменчивости производственно-логистической системы выступает производственная вариативность. В инженерном понимании она проявляется в изменении объёмов добычи и переработки во времени под воздействием технологических, геологических и организационных факторов, а также под влиянием рыночных условий. В отличие от статических моделей, предполагающих фиксированные уровни выпуска, реальные производственные системы функционируют в режиме переменной загрузки мощностей, что непосредственно влияет на структуру потоков и допустимые режимы функционирования.

Системный характер производственной вариативности определяется тем, что она непосредственно воздействует на состояние производственно-логистической системы. Состояние системы в данном случае задаётся совокупностью запасов, доступной производственной мощности и действующих ограничений по переработке и отгрузке. Изменение объёма добычи в периоде t вызывает перераспределение потоков между перерабатывающими мощностями и складскими запасами, вследствие чего в периоде $t+1$ формируется иное состояние системы. Следовательно, производственные параметры выступают элементом временной поэтапной связанности и определяют траекторию функционирования производственно-логистической системы в целом.

В исследованиях по управлению цепями поставок подчёркивается, что изменчивость производственных параметров является одной из основных причин нестабильности логистических сетей и требует динамического учёта в моделях оптимизации [29, 131]. В работах, посвящённых многокритериальной оптимизации в добывающих отраслях, показано, что производственные ограничения и ресурсные факторы существенно влияют на достижимость Парето-оптимальных решений, поскольку изменяют допустимую область функционирования системы [21, 116]. Это означает, что вариативность объёмов добычи и переработки не может

рассматриваться как внешнее возмущение, а должна быть встроена в структуру модели как параметр, влияющий на переходы состояния.

Формализация производственной вариативности в рамках динамической многокритериальной модели предполагает представление объёмов добычи и переработки как временно-зависимых параметров, связанных с балансовыми соотношениями и ограничениями мощности. Такие параметры участвуют в уравнениях перехода состояния, определяя изменение запасов и загрузки оборудования в последующих периодах. В результате допустимая область решений приобретает временную структуру, а множество Парето-оптимальных режимов становится функцией как текущих значений параметров, так и накопленного состояния системы.

Тем самым производственная вариативность выступает не внешним фоном, а структурным элементом динамики производственно-логистической системы. Она задаёт условия формирования допустимой области решений и должна учитываться при описании переходов состояния. Игнорирование данного фактора приводит к искажению динамики системы и к формированию нереалистичных режимов функционирования.

Самостоятельным источником параметрической изменчивости производственно-логистической системы является вариативность качественных характеристик угольной продукции. К числу таких характеристик относятся зольность, теплотворная способность, содержание серы, а также доля обогащённой продукции в общем объёме выпуска. В отличие от стоимостных показателей, данные параметры непосредственно определяют технологические режимы переработки и допустимость поставок для различных категорий потребителей.

Качественные характеристики изменяются во времени под влиянием геологических особенностей разрабатываемых пластов, технологии добычи, режима обогащения и структуры производственного портфеля. Изменение зольности или теплотворной способности влияет на выход товарной продукции, коэффициенты переработки и распределение потоков между сегментами рынка. Тем самым вариативность качества трансформируется в изменение технологических коэффициентов, входящих в балансовые соотношения модели.

Системное значение качественных параметров состоит в том, что они воздействуют на состояние системы через перераспределение потоков и ограничения на допустимые комбинации добычи и переработки. Если фактические характеристики сырья отклоняются от плановых значений, то это приводит к корректировке объёмов обогащения, изменению структуры складских запасов и перенаправлению потоков к потребителям с различными требованиями. Следовательно, изменение качества в периоде t формирует новое состояние системы, которое ограничивает множество допустимых режимов в периоде $t+1$. Таким образом, вариативность качества включается в структуру временной поэтапной связанности наряду с производственными объёмами.

В литературе по многокритериальной оптимизации цепей поставок подчёркивается, что параметры качества продукции формируют отдельное измерение эффективности, не сводимое к денежным показателям [83, 106]. В исследованиях, посвящённых добывающим отраслям, показано, что включение качественных характеристик в систему ограничений существенно изменяет структуру Парето-оптимальных решений, поскольку добавляет технологические ограничения и усиливает конфликт между объёмом производства и параметрами соответствия требованиям потребителей [127]. Это подтверждает необходимость формализации качества как динамического параметра, а не фиксированного коэффициента.

В рамках динамической многокритериальной модели вариативность качества должна быть представлена через временно-зависимые коэффициенты технологической трансформации и ограничения на допустимые комбинации потоков. Такие параметры влияют на уравнения перехода состояния, определяя изменение структуры запасов и распределение потоков между сегментами спроса. В результате, допустимая область решений становится функцией не только объёмов добычи, но и фактических характеристик продукции, что непосредственно отражается на конфигурации множества Парето-оптимальных решений.

Следовательно, вариативность качественных характеристик следует рассматривать как структурный элемент динамики производственно-логистической системы. Она изменяет границы допустимых режимов функционирования и усиливает многокритериальный характер задачи, поскольку параметры соответствия требованиям потребителей оказываются связанными с производственными ограничениями и логистическими возможностями.

Важным источником параметрической изменчивости выступают инфраструктурные ограничения и логистическая вариативность. В инженерном контексте под логистической вариативностью понимается изменение во времени пропускной способности элементов транспортной и складской инфраструктуры, что формирует множество допустимых комбинаций потоков между производственными и потребительскими подсистемами.

В отличие от производственных параметров, логистические параметры определяют скорость и последовательность движения материальных потоков, а также интервалы времени выполнения операций, что непосредственно отражается на состоянии системы. Изменение пропускной способности железнодорожных линий, портовых терминалов или складских хабов влияет на распределение запасов и загрузку транспортных маршрутов, изменяя систему ограничений и создавая препятствия для определённых комбинаций объёмов добычи, переработки и отгрузки.

С позиций системного анализа логистическая вариативность должна рассматриваться как элемент механизма временной поэтапной связанности, действующий через изменение состояния производственно-логистической системы. Нарушения в узлах сети и сезонные колебания

пропускной способности приводят к тому, что решения периода t изменяют доступное состояние запасов и уровень загрузки системы в периоде $t+1$. Это выражается в накоплении незавершённых грузов на складах, удлинении цепочек поставок и перераспределении транспортных потоков, вследствие чего изменяется допустимая область оптимизационной задачи.

Иначе говоря, логистическая вариативность меняет состояние системы и тем самым смещает область допустимых Парето-оптимальных решений, поскольку допускает, либо ограничивает определённые режимы распределения потоков. Научные работы в области многокритериальной оптимизации цепей поставок подчёркивают, что вариативность логистических параметров должна учитываться не только в ограничениях модели, но и в формализованных переходах состояния [24, 59, 121]. Анализ устойчивости цепей поставок показывает, что узкие места, возникающие в логистических узлах, способны индуцировать каскадные эффекты, приводящие к перераспределению запасов, увеличению времени выполнения заказов и снижению удовлетворённости потребителей при фиксированных производственных параметрах [24, 59]. Это подчёркивает необходимость учёта логистической вариативности в динамических многокритериальных моделях.

В модели параметрическая вариативность логистических ограничений реализуется через зависимые ограничения на пропускную способность и время прохождения звеньев маршрутов, которые связаны с состоянием системы в каждом периоде. Такие ограничения включаются в модель как временно-зависимые параметры, влияющие на допустимую область решений, поскольку они определяют скорость и последовательность движения потоков в пространстве состояний и решений.

Таким образом, инфраструктурные ограничения и логистическая вариативность являются структурно значимыми элементами динамической многокритериальной модели производственно-логистической системы. Они не только изменяют состояние системы, но и модифицируют временную поэтапную связанность, смещая допустимую область Парето-оптимальных решений и усиливая многокритериальный характер задачи.

Факторы, связанные с условиями спроса и реализации продукции, также относятся к числу важных источников параметрической вариативности производственно-логистической системы. В инженерной постановке под изменчивостью спроса понимается изменение потребности в угольной продукции во времени, обусловленное сезонными колебаниями, общехозяйственной конъюнктурой и изменением условий потребления. Такая изменчивость не носит изолированного характера, а трансформируется в изменение входных параметров системы, влияя на процессы планирования, распределения потоков и выбора режимов функционирования производственно-логистической системы [11, 18, 47].

По мере продвижения сигнала по звеньям цепи дисперсия спроса, как правило, возрастает; в литературе это явление обозначается как эффект «хлыста» (bullwhip effect), то есть усиление дисперсии спроса и заказов [90]. Даже сравнительно небольшие изменения конечного спроса могут обуславливать существенно более масштабные изменения заказов на вышестоящих уровнях цепи, что ведёт к накоплению запасов, перегрузке мощностей и дестабилизации логистических потоков в последующих периодах. Данное явление отражает временную поэтапную связанность между решениями периода t и состоянием системы в периоде $t+1$, в результате чего смещается допустимая область Парето-оптимальных решений [85, 96].

В практических условиях изменчивость параметров спроса выступает одним из факторов, формирующих динамическую нагрузку на подсистемы прогнозирования и планирования, поскольку ошибки прогноза усиливаются в процессе взаимодействия между уровнями производственно-логистической системы. Это приводит к отклонениям в распределении запасов, изменению состояния системы, включая уровни запасов и загрузку мощностей, и тем самым влияет на допустимые режимы её функционирования на горизонте оптимизации [50, 104].

Современные исследования подчёркивают, что высокая нестабильность спроса увеличивает операционные издержки, усугубляет риск дефицита или избыточных запасов и снижает адаптивность системы к внешним шокам, что в совокупности затрудняет достижение устойчивых режимов функционирования производственно-логистической системы [24, 33]. В контексте угольной промышленности, где конечный спрос зависит от циклов потребления электроэнергии и промышленного производства, изменение спроса отражается на всех уровнях производственно-логистической структуры и требует включения этих факторов в моделируемую оптимизационную постановку.

В модели динамической многокритериальной оптимизации вариативность спроса формализуется посредством временно-зависимых параметров спроса и прогностических ошибок, которые участвуют в уравнениях перехода состояния [109]. В результате, допустимая область решений приобретает сложную временную структуру, при которой оптимальные стратегии функционирования должны учитывать не только текущие значения производственных и логистических параметров, но и прогнозируемую динамику спроса и её влияние на состояние системы [8, 97].

Следовательно, рыночная изменчивость и вариативность спроса являются структурными элементами параметрической изменчивости, определяя форму допустимой области Парето-оптимальных решений и усиливая многокритериальность задачи. Игнорирование этих факторов приводит к упрощению модели и потере способности адекватно описывать реальную динамику функционирования сложной производственно-логистической системы.

Таким образом, к основным группам источников параметрической вариативности отнесены производственные, качественные, инфраструктурные факторы, а также факторы, связанные с параметрами спроса. Их совокупное воздействие определяет динамику производственно-логистической системы, влияет на её состояние и участвует в формировании временной поэтапной связанности, задавая конфигурацию допустимой области решений в задаче многокритериальной оптимизации. Это обосновывает необходимость учёта изменяющихся во времени параметров при построении динамической многокритериальной модели управления производственно-логистической системой.

2.4 Структурный анализ производственно-логистической системы угольной компании

Построение динамической многокритериальной модели производственно-логистической системы невозможно без предварительной формализации её топологической структуры. Если в разделе 2.1 была обоснована необходимость перехода к многокритериальной оптимизации, а в разделе 2.3 раскрыты источники параметрической вариативности, влияющие на режим функционирования системы во времени, то в настоящем разделе решается иная методологическая задача — описание конфигурации и связности элементов объекта моделирования.

Производственно-логистическая система крупной государственной угольной компании представляет собой многоуровневую сеть взаимосвязанных производственных, перерабатывающих, транспортных и сбытовых подсистем. В отличие от абстрактных моделей управления цепями поставок, где структура, как правило, сводится к укрупнённым звеньям «поставщик — производство — распределение — потребитель», реальные структуры добывающих корпораций характеризуются параллельными потоками, узлами перераспределения ресурсов, внутренними подсетями предприятий и сложной конфигурацией ограничений.

С методологической точки зрения структурный анализ направлен на исследование топологии потоков и конфигурации связей, определяющих допустимую область режимов функционирования системы [94, 95]. Для производственно-логистических систем горнодобывающих предприятий это имеет принципиальное значение, поскольку предельные объёмы реализации определяются не только уровнем добычи, но и пропускной способностью транспортных узлов, конфигурацией перерабатывающих мощностей и требованиями конечных потребителей к качественным параметрам продукции.

В настоящем исследовании структурный анализ позволяет формализовать состав и иерархию подсистем производственно-логистической системы, выявить структурные ограничения, задающие границы допустимых режимов, и создать основу для последующего

структурно-параметрического синтеза, в рамках которого параметры вариативности, выявленные в разделе 2.2, будут интегрированы в оптимизационную модель.

Тем самым структурный анализ связывает качественное описание объекта с его математической формализацией, задавая состав элементов модели, допустимые направления движения потоков и набор структурных ограничений, подлежащих учёту в динамической многокритериальной постановке.

Методологической основой структурного анализа производственно-логистической системы является представление системы в виде ориентированной сети потоков, где функциональные подсистемы выступают вершинами графа, а материальные, финансовые и информационные связи — его рёбрами. Подобная интерпретация широко применяется в теории логистических сетей и проектировании систем управления цепями поставок, поскольку позволяет формализовать конфигурацию связности и выявить структурные ограничения, определяющие допустимую область функционирования системы [25, 75].

В агрегированном виде производственно-логистическая система угольной компании может быть представлена множеством функциональных подсистем. Состав этих подсистем задаётся выражением (1):

$$SC = \{D, P, T, S\}, \quad (1)$$

где SC — производственно-логистической система как совокупность функциональных блоков;

D — блок добычи;

P — блок переработки;

T — блок транспортировки;

S — блок сбыта.

Для каждой из выделенных подсистем далее вводится базовое балансовое соотношение материальных потоков. Оно записывается в виде (2):

$$Q_{in}^i + R_i = Q_{out}^i, i \in SC, \quad (2)$$

где Q_{in}^i — входной материальный поток i -й подсистемы;

Q_{out}^i — выходной материальный поток i -й подсистемы;

R_i — внутренние ресурсы i -й подсистемы, включая производственные мощности, технологические потери и запасы.

Соотношение (2) отражает структурную согласованность потоков и задаёт базовую форму материального баланса внутри каждого звена системы.

В терминах сетевого анализа производственно-логистическая система может быть представлена графом. Такое представление задаётся выражением (3):

$$G = (V, E), \quad (3)$$

где G — сетевое представление системы;

V — множество вершин, соответствующих узлам производственно-логистической системы;

E — множество рёбер, отражающих связи и материальные потоки между узлами.

Сетевая интерпретация позволяет учитывать параллельные связи, альтернативные маршруты перемещения продукции и распределение нагрузок между узлами, что особенно важно для крупных добывающих корпораций с распределённой инфраструктурой. В отличие от линейной схемы, сетевое представление отражает реальную конфигурацию потоков и даёт возможность выявить структурные ограничения, определяющие пределы функционирования системы [32].

Специфика производственно-логистической системы угольной компании заключается в её многоуровневом характере. Каждый агрегированный функциональный блок включает совокупность производственных единиц — шахты, обогатительные фабрики, базы смешения, транспортные узлы и сбытовые подразделения. Формально предприятие может быть представлено как множество элементов второго уровня, образующих иерархическую структуру внутренних подсистем. Такая декомпозиция позволяет перейти от укрупнённого описания к детальному анализу распределения потоков внутри подсистем. Именно этот уровень детализации используется далее при построении топологической модели.

Структурный анализ в данном контексте направлен не только на описание состава элементов, но и на выявление конфигурации ограничений, формирующих границы допустимых режимов функционирования. Ограничения пропускной способности транспортных звеньев, мощности перерабатывающих установок и требований к качественным характеристикам продукции задают предельные значения потоков и определяют устойчивость всей системы. В сетевых моделях такие элементы интерпретируются как структурные узлы, от которых зависит форма допустимой области режимов [46, 51].

Производственно-логистическая система функционирует одновременно в материальном, финансовом и информационном измерениях [86]. Материальные потоки обеспечивают физическое перемещение продукции, финансовые — перераспределение стоимости и инвестиционных ресурсов, информационные — координацию планов добычи, переработки и поставок. Их согласованность определяет целостность системы и влияет на конфигурацию допустимых состояний во времени [44, 86].

Следовательно, структурный анализ задаёт топологическое описание производственно-логистической системы, определяя состав подсистем, характер их связности и конфигурацию ограничений, формирующих границы функционирования. На этой основе становится возможным дальнейший структурно-параметрический синтез и переход к динамической многокритериальной оптимизации.

Агрегированное представление производственно-логистической системы в виде множества функциональных блоков позволяет зафиксировать базовую конфигурацию потоков между добычей, переработкой, транспортировкой и сбытом. На данном уровне система интерпретируется как последовательность звеньев, где выход одного блока формирует вход следующего, а материальные потоки описываются укрупнёнными балансами. Такая модель задаёт первичную архитектуру объекта и служит точкой отсчёта для дальнейшей формализации.

Агрегированная линейная структура представлена на рисунке 8. Схема отражает топологию первого уровня, в которой каждое звено рассматривается как единая подсистема с совокупной пропускной способностью. Данное представление позволяет формализовать общий контур движения продукции, однако оно не раскрывает внутренней структуры потоков и не учитывает распределённый характер производственной инфраструктуры.

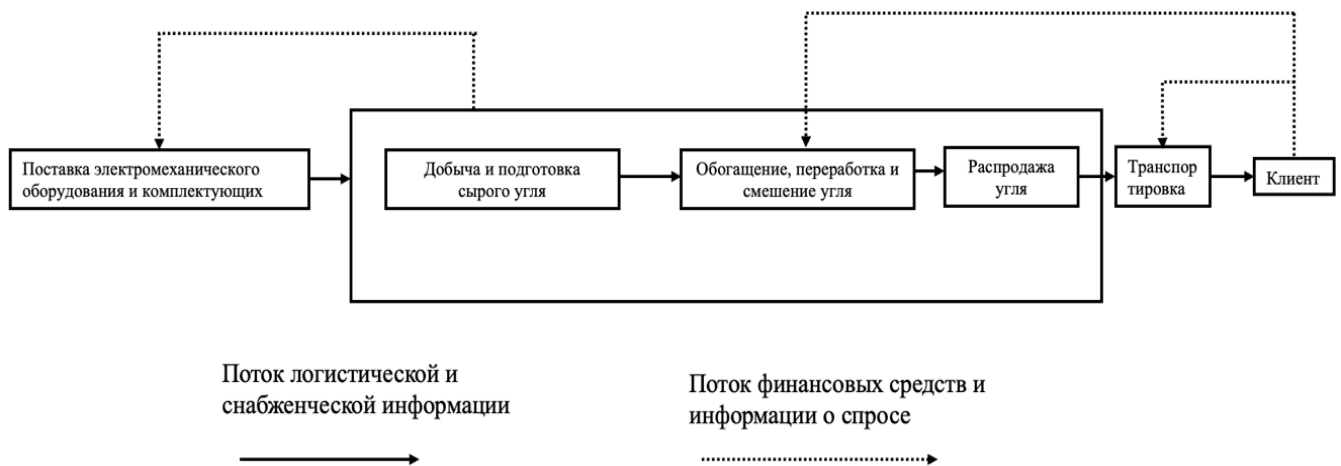


Рисунок 8 — Агрегированная линейная модель производственно-логистической системы
(составлено автором)

Для корректного описания функционирования крупной угольной компании необходимо перейти к иерархической декомпозиции. Каждый агрегированный блок включает множество производственных единиц и технологических узлов. Формально предприятие E_x представляется как совокупность элементов второго уровня по формуле (4):

$$E_x = \{U_{xy}\}, x = 1, \dots, X; y = 1, \dots, Y, \quad (4)$$

где E_x — x -й агрегированный блок-системы;

U_{xy} — элементы второго уровня, отражающие шахты, обогатительные фабрики, базы смешения, транспортные терминалы и сбытовые подразделения;

X — число агрегированных блоков;

Y — число элементов второго уровня в составе соответствующего блока.

В результате, производственно-логистическая система приобретает форму иерархической сети, в которой материальные потоки могут разделяться, объединяться и перераспределяться между альтернативными маршрутами. Подобная конфигурация соответствует сетевым моделям

управления цепями поставок, применяемым в инженерных исследованиях логистических систем [111, 118], и принципиально отличается от линейной схемы последовательных операций.

Иерархическая сетевая модель производственно-логистической системы представлена на рисунке 9. В данной модели каждая производственная единица интерпретируется как вершина графа, а материальные потоки — как ориентированные рёбра. Такая формализация позволяет выявить параллельные связи, критические узлы и концентрацию потоков в отдельных сегментах сети. В отличие от агрегированной схемы, топологическая модель фиксирует распределённый характер инфраструктуры и создаёт основу для количественного описания потоков между конкретными элементами.

Принципиально важно, что топологическая структура определяет допустимые направления движения продукции и формирует систему ограничений, обусловленных мощностями узлов и пропускной способностью связей. Следовательно, структура сети непосредственно влияет на границы возможных режимов функционирования, поскольку изменение нагрузки в одном узле распространяется на связанные элементы через систему потоков.

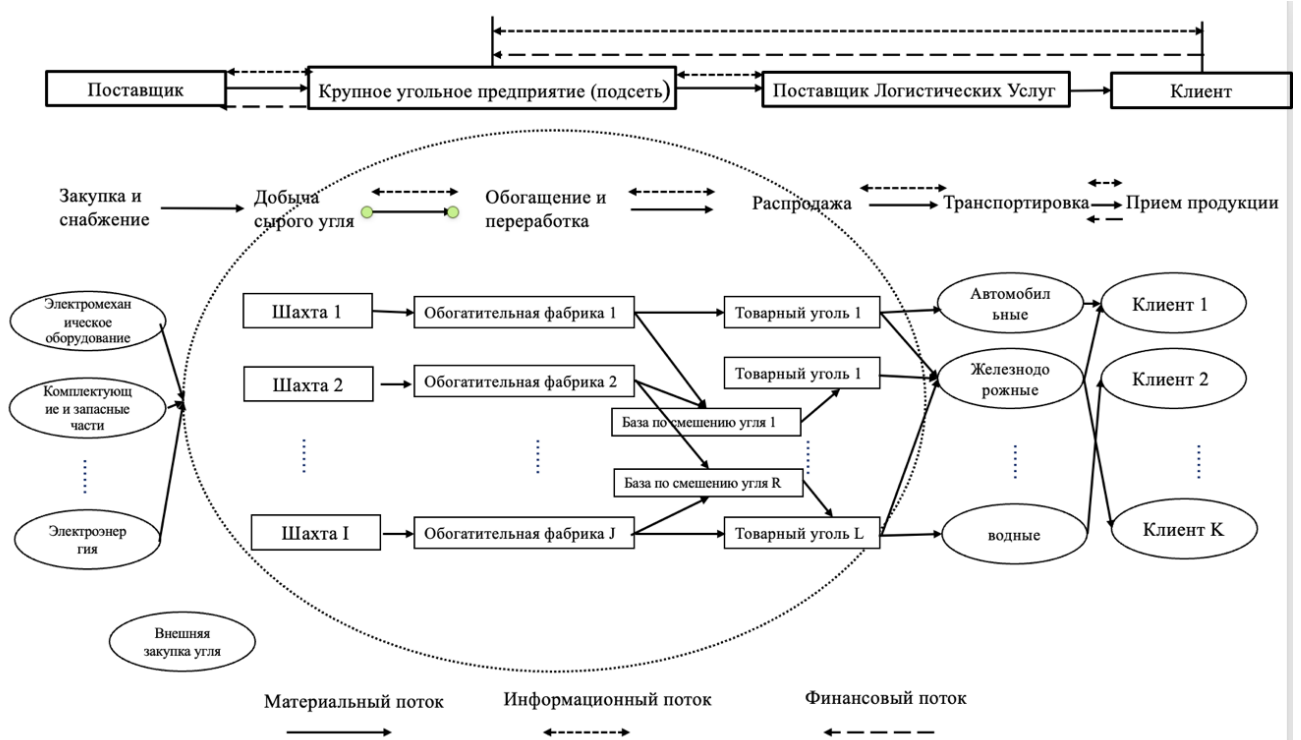


Рисунок 9 — Топологическая модель производственно-логистической системы угольной компании (составлено автором)

Тем самым структурный анализ производственно-логистической системы угольной компании позволяет перейти от укрупнённого описания функциональных блоков к иерархической сетевой модели объекта. Выявленные элементы, связи и структурные ограничения формируют основу дальнейшей математической формализации подсистем,

параметров и ограничений, выполняемой в следующей главе при построении динамической многокритериальной модели.

2.5 Энтропийный подход к оценке структурной сложности производственно-логистической системы угольной компании

Результаты структурного анализа производственно-логистической системы, выполненного в предыдущем подразделе, позволяют описать конфигурацию сети и выделить ключевые звенья формирования и перемещения угольной продукции. Для сопоставимой количественной характеристики того, насколько дифференцированно распределяются отклонения режимов по различным узлам и процессам (добыча, переработка, реализация), необходим интегральный показатель, инвариантный к масштабу наблюдений и пригодный для сравнения распределений. В настоящем исследовании для этой цели применяется энтропийный показатель, восходящий к определению К. Шеннона, где энтропия интерпретируется как мера неопределённости вероятностного распределения и, в прикладной постановке, как количественная характеристика структурной дифференциации наблюдаемых состояний системы [57, 92].

Важно отметить, что в рамках главы 2 энтропийный показатель используется как диагностическая характеристика структуры распределения наблюдаемых отклонений и не включается в состав целевых функций оптимизационной модели. Следовательно, энтропийная оценка не подменяет показатели интегральной ресурсной результативности и логистической устойчивости выполнения заказов и не выступает компонентой оптимизационной постановки, а обеспечивает количественное описание конфигурации распределений, дополняющее результаты структурного анализа и подготавливает переход к параметризации динамической модели.

В прикладной интерпретации, используемой в работе, источники отклонений в производственно-логистической системе целесообразно разделять на внутренние и внешние. Данное разделение вводится не как термодинамическое тождество, а как структурно-интерпретационная схема, позволяющая упорядочить факторы, формирующие распределение наблюдаемых состояний. В этом смысле совокупное действие факторов может быть условно представлено соотношением (5):

$$dS = dS_i + dS_e, \quad (5)$$

где dS — совокупный эффект отклонений;

dS_i — вклад внутренних причин, связанных с режимами добычи и переработки, технологическими потерями, состоянием запасов и внутрисистемной координацией;

dS_e — вклад внешних воздействий, обусловленных ограничениями транспортной инфраструктуры, изменениями спроса и контрактных условий.

Указанное разложение используется исключительно для интерпретации структуры факторов и не является элементом целевых функций модели.

На рисунке 10 показана схема соотнесения звеньев производственно-логистической системы и групп факторов, которая далее применяется для обоснования расчёта энтропийного показателя по отдельным блокам данных (добыча, качество, реализация).

Пусть наблюдаемая характеристика процесса, например отклонение «факт — план» по добыче, качеству или реализации, принимает дискретные состояния $x_i, i = 1, \dots, n$, а вероятности состояний определяются как относительные частоты $p(x_i)$, удовлетворяющие условиям $p(x_i) \geq 0$ и $\sum_{i=1}^n p(x_i) = 1$. Тогда энтропия распределения задаётся выражением Шеннона (6) [57]:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (6)$$

где $H(X)$ — энтропия распределения случайной величины X ;

x_i — i -е дискретное состояние наблюдаемой характеристики;

$p(x_i)$ — вероятность состояния x_i ;

n — число дискретных состояний.

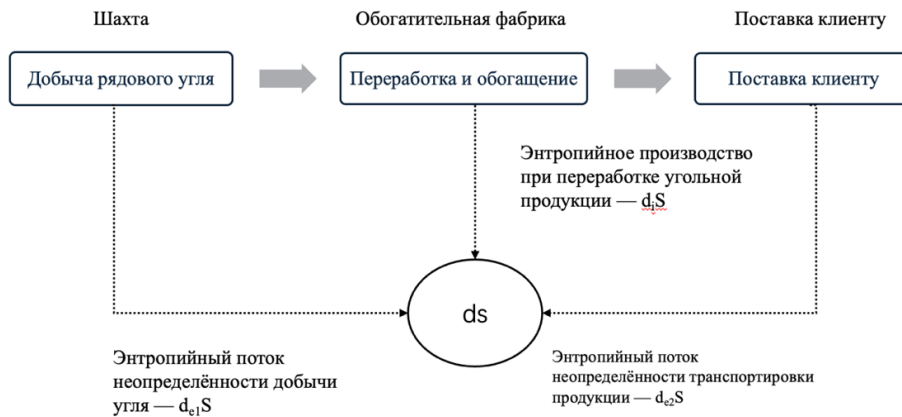


Рисунок 10 — Структура энтропии производственно-логистической системы: внутренние и внешние источники формирования распределения отклонений (составлено автором)

В применении к диагностике структуры отклонений используется классификация наблюдений по состояниям. Для каждого наблюдения рассчитывается отклонение, после чего задаётся порог допустимости и формируется разбиение на две группы: контролируемые состояния Т, соответствующие отклонениям в допустимых пределах, и неконтролируемые состояния NT, соответствующие отклонениям, выходящим за заданный порог. В рамках принятой методики в энтропийную сумму включаются состояния группы NT, поскольку именно они отражают распределение существенных отклонений по интервалам; вклад группы Т по соглашению принимается равным нулю [57, 92]. Такая трактовка используется в прикладных

исследованиях, где энтропия выступает показателем структурной дифференциации распределения отклонений в производственно-логистических системах [74].

Для количественной иллюстрации энтропийной диагностики в диссертации используются данные корпоративной отчётности, включающие сопоставление плановых и фактических значений по добыче, качественным характеристикам (зольности) и реализации товарного угля по ряду производственных единиц. На основе этих материалов сформированы три таблицы, отражающие плановые и фактические значения, а также вычисленные отклонения, которые далее используются для распределения наблюдений по состояниям и вычисления вероятностей по формуле (7):

$$p(x_i) = \frac{F(x_i)}{N}, \quad (7)$$

где $p(x_i)$ — вероятность состояния;

$F(x_i)$ — частота состояния;

N — объём выборки.

В таблицах 19–21 приведены исходные данные, применяемые для расчёта энтропийных значений.

Таблица 19 — Плановые и фактические объёмы добычи сырого угля на шахтах China Coal (составлено автором по данным годовых отчётов *China Coal*)

Шахта	Плановый объём добычи, тыс. т	Фактический объём добычи, тыс. т	Отклонение (факт — план), тыс. т
Антайбао	5400	5550	+150
Ванцзялин	1200	1250	+50
Яоцяо	800	820	+20
Сюйчжуан	400	410	+10
Налинхэ № 2	2450	2480	+30
Мудучайден	1600	1620	+20
Наньян	520	540	+20
Илань № 3	430	440	+10
Даньяньху № 10	850	870	+20
Вэйцзыгоу	350	360	+10

Таблица 20 — Зольность товарного угля одной из крупных угольных компаний (составлено автором по данным годовых отчётов *China Coal*)

Шахта	Плановое значение зольности, %	Фактическое значение зольности, %	Отклонение (факт — план)
Антайбао	33,2	10,5	–22,7
Ванцзялин	35,8	11,0	–24,8
Яоцяо	32,0	10,0	–22,0
Сюйчжуан	29,5	10,2	–19,3
Налинхэ № 2	30,0	9,5	–20,5
Мудучайден	30,5	10,0	–20,5

Продолжение таблицы 20

Шахта	Плановое значение зольности, %	Фактическое значение зольности, %	Отклонение (факт — план)
Наньлян	29,8	10,8	-19,0
Илань № 3 (без обогащения)	34,0	—	—
Даньаньху № 10	30,2	9,8	-20,4
Вэйцзыгоу	30,5	11,0	-19,5

Таблица 21 — Объёмы реализации товарного угля крупной угольной компании (составлено автором по данным годовых отчётов *China Coal*)

Шахта	Плановый объём реализации, тонн	Фактический объём реализации, тонн	Отклонение (факт — план)
Антайбао	5150	5200	+50
Ванцзялин	1220	1250	+30
Яоцяо	800	810	+10
Сюйчжуан	400	410	+10
Налинхэ № 2	2400	2450	+50
Мудучайден	1600	1620	+20
Наньлян	520	540	+20
Илань № 3	430	440	+10
Даньаньху № 10	850	870	+20
Вэйцзыгоу	350	360	+10

После вычисления отклонений наблюдения распределяются по дискретным состояниям, соответствующим интервалам отклонений, а вероятности состояний определяются на основе относительных частот по приведённой выше формуле. Энтропия далее рассчитывается по выражению Шеннона как сумма вкладов состояний, отнесённых к группе NT. Результаты расчётов по каждому из трёх блоков данных приведены в таблицах 22–24.

Таблица 22 — Распределение состояний по отклонениям добычи и энтропия (по данным автора)

Состояние (x_i), ($ \Delta $, тыс. т)	Частота F	Вероятность P	$\log_2 P(x_i)$	$P(x_i) \cdot \log_2 P(x_i)$
Контролируемое состояние (x_1)	0,0	0,0	—	—
Неконтролируемые состояния	$x_2(+10 \sim +8)$	0,0	—	—
	$x_3(+7 \sim +9)$	0,1	-3,32193	-0,33219
	$x_4(+4 \sim +6)$	0,3	-1,73697	-0,52109
	$x_5(+1 \sim +3)$	0,4	-1,32193	-0,52877
	$x_6(-3 \sim -1)$	0,2	-2,32193	-0,46439
	$x_7(-6 \sim -4)$	0,0	—	—
	$x_8(-9 \sim -7)$	0,0	—	—
$x_9(-\infty \sim -10)$	0,0	—	—	—
Общая энтропия $H(x)$ ($d_{ei}S$)	1,8464			

Таблица 23 — Распределение состояний по отклонениям зольности и энтропия (по данным автора)

Состояние (xi), (Δ , тыс. т)	Частота F	Вероятность P	log ₂ P(xi)	P(xi)·log ₂ P(xi)	
Контролируемое состояние (x ₁)	1,0	0,1	—	—	
Неконтролируемые состояния	x ₂ (+10 ~ +8)	0,0	—	—	
	x ₃ (+7 ~ +9)	0,0	—	—	
	x ₄ (+4 ~ +6)	0,0	—	—	
	x ₅ (+1 ~ +3)	0,0	—	—	
	x ₆ (-3 ~ -1)	0,8	-0,32193	-0,25754	-0.25754
	x ₇ (-6 ~ -4)	0,1	-3,32193	-0,33219	-0.33219
	x ₈ (-9 ~ -7)	0,0	—	—	—
x ₉ (-∞ ~ -10)	0,0	—	—	—	
Общая энтропия H(x) (d _{ei} S)	0,5897				

Таблица 24 — Распределение состояний по отклонениям продаж и энтропия (по данным автора)

Состояние (xi), (Δ , тыс. т)	Частота F	Вероятность P	log ₂ P(xi)	P(xi)·log ₂ P(xi)	
Контролируемое состояние (x ₁)	0	0	—	—	
Неконтролируемые состояния	x ₂ (+10 ~ +8)	2,0	0,2	-2,32193	-0,46439
	x ₃ (+7 ~ +9)	2,0	0,2	-2,32193	-0,46439
	x ₄ (+4 ~ +6)	1,0	0,1	-3,32193	-0,33219
	x ₅ (+1 ~ +3)	2,0	0,2	-2,32193	-0,46439
	x ₆ (-3 ~ -1)	2,0	0,2	-2,32193	-0,46439
	x ₇ (-6 ~ -4)	1,0	0,1	-3,32193	-0,33219
	x ₈ (-9 ~ -7)	0,0	0,0	—	—
	x ₉ (-∞ ~ -10)	0,0	0,0	—	—
Общая энтропия H(x) (d _{ei} S)	2.5219				

Полученные значения энтропии интерпретируются как показатели структурной дифференциации распределения существенных отклонений по заданным интервалам состояний. Более высокое значение H(x) соответствует более распределённой структуре состояний, тогда как снижение H(x) соответствует концентрации наблюдений в ограниченном наборе интервалов. В рамках главы 2 данный результат используется для сопоставимого описания структуры распределения состояний в различных процессах производственно-логистической системы и для построения сводной диагностической картины перед переходом к этапу параметризации динамической модели.

Для агрегированного представления результатов в таблице 25 приведено сопоставление трёх компонент и суммарного значения, рассчитанного как сумма частных энтропий, используемая в качестве интегрального диагностического индикатора структурной сложности распределения отклонений по наблюдаемым блокам.

Таблица 25 — Сводные результаты энтропийной оценки (по данным автора)

Компонента	Энтропия
Добыча	1,8464
Качество (зольность)	0,5897

Продолжение таблицы 25

Компонента	Энтропия
Реализация	2,5219
Итого (агрегированное значение)	4,9581

Для повышения интерпретируемости результатов в таблице 26 приведено иллюстративное сопоставление полученных значений с референтным примером производственно-логистической системы общего типа. Такое сравнение используется исключительно как диагностический приём и не переносится на целевые функции оптимизационной модели.

Таблица 26 — Сопоставление агрегированного энтропийного показателя (иллюстративный пример автора)

Тип неопределённости	Производственно-логистическая система крупной угольной компании	Система снабжения обычного производственного предприятия
Неопределённость производства de_1S	1,8464	1,3177
Неопределённость реализации продукции de_2S	0,5897	0,6644
Неопределённость внутренней переработки d_iS	2,5219	2,6464
Итого ds	4,9581	4,6285

Агрегированное значение для производственно-логистической системы угольной компании оказывается выше, чем в иллюстративном примере производственного предприятия. Это означает более дифференцированную структуру распределения существенных отклонений по дискретным состояниям. Такое сопоставление в рамках главы 2 служит лишь диагностическим дополнением к структурному анализу и не влияет на последующую формализацию целевых ориентиров оптимизационной модели.

Таким образом, энтропийный показатель выполняет в настоящем исследовании функцию количественного описания структурной сложности распределения наблюдаемых отклонений и обеспечивает сопоставимость результатов между различными блоками данных. Полученные результаты дополняют структурный анализ производственно-логистической системы и создают диагностическую основу для последующей параметризации динамической модели в следующем подразделе.

2.6 Прогнозирование объемов добычи продукции угольной компанией China Coal на ближайший период с учетом неопределенности и вариативности параметров

Построение динамической многокритериальной модели производственно-логистической системы требует не только задания структуры потоков и системы ограничений, но и обоснования численных параметров, характеризующих режим функционирования объекта на горизонте

планирования. В рамках настоящего исследования параметризация понимается как переход от наблюдаемых статистических и корпоративных данных к формализованным зависимостям и сценарным условиям, которые используются при калибровке целевых функций и ограничений модели в главах 3—4.

Для решения этой задачи в настоящем исследовании последовательно применяются два взаимодополняющих инструмента. Во-первых, многомерный корреляционно-регрессионный анализ используется для выявления устойчивых функциональных связей между производственными, логистическими, качественными и рыночными показателями деятельности China Coal и для формирования параметров экономической составляющей модели. Во-вторых, прогнозирование на основе моделей временных рядов и сценарного подхода применяется как средство задания допустимых траекторий ключевых объёмных параметров во времени и формирования диапазонов возможных режимов функционирования системы при изменении внешних условий.

Тем самым раздел связывает методологические положения главы 2 с формализованной постановкой оптимизационной задачи: результаты регрессионной калибровки и сценарной параметризации задают исходные численные условия, необходимые для воспроизводимости вычислительного эксперимента и интерпретации Парето-оптимальных решений.

2.6.1 Регрессионная параметризация интегрального показателя результативности и факторов внешней среды

Формирование экономической составляющей динамической многокритериальной модели требует количественного описания зависимости финансового результата предприятия от совокупности производственных, логистических и рыночных параметров функционирования производственно-логистической системы. Для решения данной задачи в работе применяется многомерный корреляционно-регрессионный анализ на основе временных рядов China Coal Energy за 2003—2024 гг., при этом пакет SPSS Statistics используется исключительно как вычислительный инструмент для оценки параметров моделей и проведения статистической диагностики.

В качестве зависимой переменной Y выбрана рентабельность продаж. Использование рентабельности, а не абсолютной прибыли, обусловлено необходимостью исключить влияние масштабного фактора и обеспечить сопоставимость оценок для различных периодов и сценарных условий. В отличие от прибыли, чувствительной к изменению объёмов и инфляционным эффектам, рентабельность отражает относительную эффективность функционирования системы и позволяет корректно оценивать влияние отдельных факторов при изменении масштабов производства. Выбор данного показателя согласуется с последующей оптимизационной

постановкой, в которой экономическая результативность входит в состав векторной цели, а коэффициенты регрессии используются для её количественной параметризации. Перечень исходных объясняющих переменных сформирован на основе системы показателей, обоснованной в п. 1.4.3, что обеспечивает преемственность эмпирической базы исследования. В таблице 27 приведён перечень переменных с их экономической интерпретацией и единицами измерения.

Таблица 27 — Переменные для корреляционно-регрессионного анализа производственно-логистической системы China Coal (по данным автора)

Категория показателей	Переменная	Обозначение	Единица	Смысловое значение для модели
Зависимая переменная (Y)	Рентабельность	Y	%	Относительный показатель экономической результативности
Производственный блок	Добыча угля	X ₁	млн т	Отражает производственный потенциал компании
	Продажи угля	X ₂	млн т	Характеризует фактический объём реализации и рыночное покрытие
Логистический блок	Объём перевозок угля	X ₃	млн т	Пропускная способность транспортной подсистемы
	Транспортные расходы	X ₄	млрд юаней	Основной элемент себестоимости и показатель эффективности логистики
	Время перевозки	X ₅	сут	Индикатор скорости выполнения заказов, влияет на оборачиваемость капитала
	Средний запас	X ₆	млн т	Характеризует гибкость цепочки и уровень «замороженных» ресурсов
	Задержки перевозок	X ₇	ед.	Прямой индикатор устойчивости логистической подсистемы
Рыночный блок	Цена энергетического угля	X ₈	юань/т	Ключевой внешний фактор, определяющий выручку
	Цена коксующегося угля	X ₉	юань/т	Влияет на сегмент коксующихся углей и общую рентабельность
ESG / социальный блок	Численность персонала	X ₁₀	чел.	Показатель социальной устойчивости и влияния трудовых ресурсов
	Экологические расходы (при наличии данных)	X ₁₁	млрд юаней	Вклад в устойчивое развитие и выполнение регулятивных требований

Расширенная спецификация модели в общем виде задаётся выражением (8) [71]:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon. \quad (8)$$

где Y — зависимая переменная;

β_0 — свободный член;

β_m — параметры модели;

X_m — показатели производственного, логистического и рыночного контуров;

ε — случайная ошибка.

На предварительном этапе проводится корреляционный анализ. На рисунке 11 представлена корреляционная матрица, визуализирующая структуру связей между переменными и позволяющая предварительно идентифицировать группы сильно коррелированных факторов. Данная процедура необходима для выявления мультиколлинеарности и исключения статистически избыточных показателей, описывающих одну и ту же физическую составляющую системы (например, добыча и продажи).

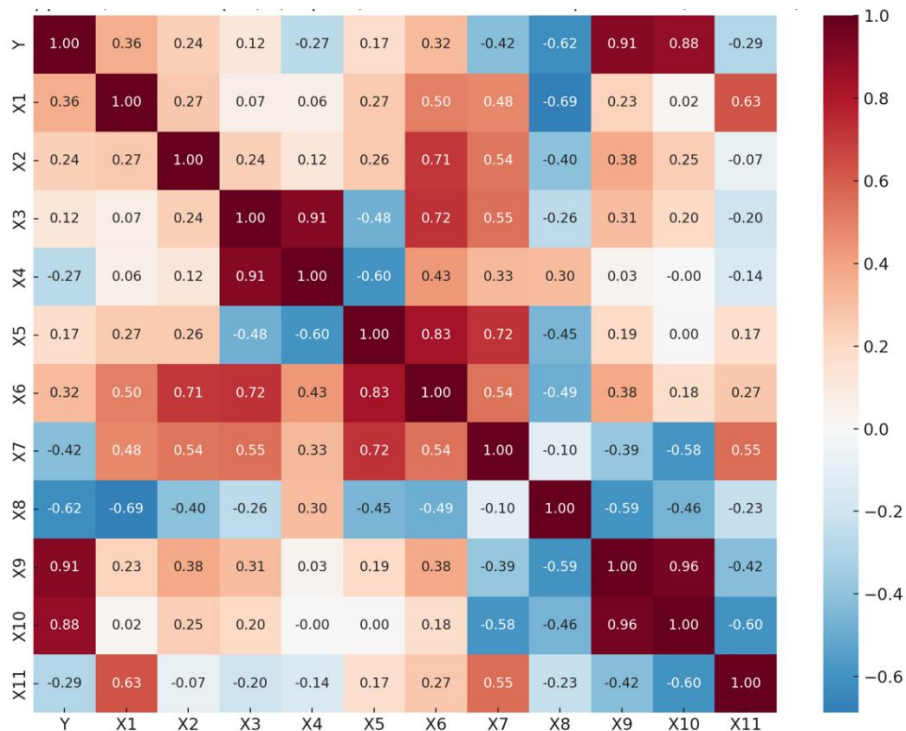


Рисунок 11 — Корреляционная матрица для переменных China Coal (составлено автором)

В результате были отобраны следующие показатели: цена энергетического угля (X_9) как отражение рыночной конъюнктуры, объём добычи (X_1) как базовый производственный фактор, транспортные расходы (X_6) как индикатор логистической эффективности и средний запас угля (X_7) как характеристика гибкости и устойчивости снабженческой системы. Формализованная модель имеет вид (9):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_9 + \beta_2 X_1 + \beta_3 X_6 + \beta_4 X_7 + \varepsilon. \quad (9)$$

Цена угля отражает воздействие внешней рыночной среды, объём добычи — производственный потенциал системы. Транспортные расходы выбраны в качестве

интегрального показателя загрузки логистической подсистемы, поскольку они отражают как объёмы перевозок, так и тарифные условия и инфраструктурные ограничения. Включение среднего уровня запасов позволяет учесть влияние решений предыдущих периодов на текущую результативность, что принципиально для динамической постановки задачи: запасы выступают параметром состояния системы, отражающим межпериодную связанность решений.

Оценка коэффициентов модели выполнялась в среде SPSS Statistics. В таблице 28 приведены точечные оценки коэффициентов, их стандартные ошибки, t-статистики и уровни значимости. Дополнительно проведена диагностика модели, по результатам которой анализ VIF не выявил существенной линейной зависимости между объясняющими переменными, критерий Дарбина—Уотсона не показал автокорреляции остатков, а проверка распределения ошибок подтвердила их приемлемое соответствие нормальному закону. Это свидетельствует о статистической устойчивости полученной спецификации и корректности интерпретации коэффициентов.

Таблица 28 — Результаты множественной регрессии (по данным автора)

Переменная	Коэффициент	Стандартная ошибка	t-статистика	p-значение
Константа	-11,7900	15,4200	-0,7600	0,4700
X9 (цена энергетического угля, юань/т)	+0,0237	0,0087	2,7300	0,0260 **
X1 (добыча угля, млн т)	+0,0587	0,0270	2,1600	0,0550 *
X6 (транспортные расходы, млрд юаней)	+0,0177	0,0260	0,6900	0,5080
X7 (средний запас, млн т)	-0,3749	0,2150	-1,7400	0,1180

Примечание: значимо на уровне 5%, *значимо на уровне 10%. $R^2=0.906$, скорректированный $R^2=0.853$, $F=16.9$ ($p < 0.01$).

Тем самым регрессионная параметризация устанавливает количественную связь между наблюдаемыми характеристиками функционирования компании и формализованной структурой оптимизационной задачи. Полученные коэффициенты используются при калибровке экономической компоненты динамической многокритериальной модели и обеспечивают переход от эмпирического анализа к построению Парето-оптимальных режимов функционирования производственно-логистической системы в главах 3—4.

2.6.2 Сценарная параметризация производственных объёмов

Динамическая постановка задачи оптимизации производственно-логистической системы предполагает задание траектории ключевых объёмных параметров на горизонте планирования. В статической модели параметры рассматриваются как фиксированные величины, тогда как в динамической системе они изменяются во времени и формируют последовательность состояний.

В настоящем исследовании данная задача решается посредством сценарной параметризации производственных объёмов добычи угля [3, 4].

В качестве базового инструмента количественного прогнозирования используется модель ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average), позволяющая описывать нестационарные временные ряды с учётом трендовой и случайной составляющих [7, 102]. Общая форма модели ARIMA (p, d, q) задаётся по формуле (10):

$$\varphi(B)(1 - B)^d y_t = \theta(B)\varepsilon_t, \quad (10)$$

где y_t — объём добычи в период t ;

B — оператор сдвига;

d — порядок дифференцирования;

$\varphi(B)$ — полиномы авторегрессии;

$\theta(B)$ — полином скользящего среднего;

ε_t — случайная ошибка.

Оценка параметров модели выполнялась в SPSS Statistics методом максимального правдоподобия. Полученная инерционная траектория представляет собой прогноз, основанный исключительно на выявленной внутренней динамике временного ряда без учёта внешних шоков и структурных ограничений. Иными словами, инерционная траектория отражает развитие системы при сохранении исторически сложившихся статистических закономерностей [5].

Однако для целей оптимизационного моделирования такая экстраполяция является недостаточной. В соответствии с результатами структурного анализа (см. п. 2.3), объёмы добычи ограничиваются пропускной способностью транспортной инфраструктуры, производственными мощностями и институциональными регламентами. В связи с этим базовый прогноз корректируется введением параметров инженерного ограничения, задаваемых системой соотношений (11):

$$\begin{aligned} y_t &\leq \alpha \cdot \max(y_{\text{hist}}), \\ y_t &\geq \beta \cdot y_{t-1}, \\ y_t^{\text{adj}} &= y_{t-1} + \lambda(\hat{y}_t - y_{t-1}), \end{aligned} \quad (11)$$

где α — коэффициент, отражающий фактически достижимую долю исторического максимума добычи с учётом технологических и инфраструктурных узких мест;

y_{hist} — исторические значения объёма добычи;

β — параметр, учитывающий инерцию контрактных обязательств и невозможность резкого сокращения производства;

λ — коэффициент скорости адаптации системы к новому уровню;

\hat{y}_t — прогнозное значение объёма добычи, полученное по модели ARIMA;

y_t^{adj} — скорректированное прогнозное значение объёма добычи в период t .

Коэффициент α в диапазоне 0,90–0,95 отражает фактически достижимую долю исторического максимума добычи с учётом технологических и инфраструктурных ограничений. Параметр β принимаемый на уровне около 0,85, учитывает инерцию контрактных обязательств и невозможность резкого сокращения производства. Коэффициент λ в диапазоне 0,50–0,70 характеризует скорость адаптации системы к новому уровню, отражая управляемость и гибкость производственно-логистической структуры.

В результате формируется допустимый диапазон изменения добычи, сочетающий статистическую динамику с инженерными ограничениями, выявленными на этапе структурной диагностики сети.

Для учёта неопределённости внешней среды дополнительно формируются альтернативные сценарии, моделирующие воздействие ценовой конъюнктуры, регуляторных ограничений и логистических стрессов. Корректировка базовой траектории осуществляется посредством изменения параметров и введения коэффициентов чувствительности к ценовым и транспортным факторам. Таким образом, каждый сценарий задаёт отдельную допустимую траекторию состояний системы.

Сценарий S0 соответствует инерционному развитию компании и представляет собой прогноз ARIMA, скорректированный с учётом ограничений реализуемости. Сценарий S1 описывает благоприятную ценовую конъюнктуру, стимулирующую рост добычи. Сценарий S2 отражает неблагоприятную ценовую динамику, сдерживающую расширение добычи. Сценарий S3 характеризует регуляторные ограничения, сужающие допустимый верхний предел добычи и повышающие инерционность адаптации. Сценарий S4 моделирует логистический стресс, при котором ограниченность транспортного контура снижает реализуемый уровень добычи. Тем самым сценарные траектории задают альтернативные условия функционирования производственно-логистической системы на горизонте планирования.

Информационную базу прогнозирования составляют статистические материалы China Coal и годовые отчёты компании за 2013–2025 гг., содержащие данные о добыче, объёмах реализации, транспортных потоках, затратах и финансовых результатах. Итоговые прогнозные значения и сценарные траектории представлены в табличной и графической форме. Построенные траектории далее используются как входные условия динамической постановки задачи: они задают допустимые границы изменения производственных решений по периодам и определяют область поиска Парето-оптимальных режимов в рамках многокритериальной оптимизации, рассматриваемой в главах 3–4.

Результаты расчётов представлены на рисунке 12, где показаны исторические значения добычи за 2013—2024 гг. и прогнозные траектории на горизонте 2025—2030 гг. Базовый сценарий демонстрирует стабилизацию добычи на уровне, близком к текущим

производственным мощностям. Альтернативные сценарии формируют верхнюю и нижнюю границы интервала, характеризующего чувствительность системы к изменению внешних условий. Размах между крайними сценариями интерпретируется как параметрическая зона неопределённости, в пределах которой должна обеспечиваться устойчивость функционирования производственно-логистической системы.



Рисунок 12 — Добыча угля: исторические данные и сценарный прогноз (составлено автором)

С методологической точки зрения сформированный сценарный интервал выполняет роль динамического ограничения модели. Он задаёт допустимые границы производственных решений в каждом периоде и тем самым определяет область поиска Парето-оптимальных режимов в рамках многокритериальной оптимизации. В отличие от детерминированного прогноза, используемого в традиционных исследованиях, в данной работе сценарная параметризация рассматривается как инструмент формирования допустимого множества состояний системы, согласованного с её структурными ограничениями.

Таким образом, раздел 2.5 завершает формирование параметрического обеспечения динамической многокритериальной модели. Если в подразделах 2.1—2.3 были обоснованы методологические принципы постановки задачи, выявлены источники параметрической вариативности и формализована топологическая структура производственно-логистической системы, то в настоящем разделе соответствующие положения переведены в количественную форму.

Регрессионный анализ позволил определить чувствительность результата к ключевым производственным, логистическим и рыночным параметрам и тем самым задать коэффициентную структуру цели модели. Сценарная параметризация, в свою очередь, сформировала допустимые интервалы изменения объёмных показателей во времени, обеспечив согласование статистической динамики с выявленными структурными ограничениями.

В совокупности полученные результаты задают числовые границы допустимой области решений и формируют воспроизводимую эмпирическую базу для оптимизационной постановки, представленной в главе 3. Тем самым обеспечивается переход от анализа функционирования системы к формализованному поиску Парето-оптимальных режимов её развития в условиях многокритериальности и динамической изменчивости параметров.

2.7 Выводы по второй главе

Во второй главе диссертационного исследования выполнено обоснование методов оценки состояния и прогнозирования развития производственно-логистической системы угольной компании Китая в условиях неопределённости.

В подразделе 2.1 дана оценка существующих методов оптимизации внутренних цепей поставок в угольной отрасли. Установлено, что применение традиционных подходов к исследованию производственно-логистических систем крупных угольных компаний ограничено преобладанием статических и однокритериальных постановок, недостаточно учитывающих структурную сложность объекта, временную поэтапную связанность его параметров и конфликтный характер управленческих требований.

В подразделе 2.2 обоснованы методологические основы оптимизации производственно-логистической системы угольной компании Китая. Показано, что для исследуемого объекта методологически необходим переход от однокритериальных и статических моделей к динамической многокритериальной постановке задачи. Установлено, что производственно-логистическая система крупной угольной компании характеризуется конфликтом целевых ориентиров, временной поэтапной связанностью решений и сложной конфигурацией ограничений, что требует построения множества Парето-оптимальных режимов функционирования.

В подразделе 2.3 исследовано влияние параметрической неопределённости и вариативности на процессы функционирования производственно-логистической системы. Производственные, логистические, качественные и рыночные факторы рассмотрены как параметры, определяющие изменчивость состояния системы во времени и влияющие на допустимые режимы её функционирования.

В подразделе 2.4 выполнен структурный анализ производственно-логистической системы угольной компании Китая. Производственно-логистическая система представлена как многоуровневая структура взаимосвязанных потоков, включающая производственные и логистические подсистемы. Определены ключевые узлы и структурные ограничения, задающие границы допустимых режимов функционирования и требования к согласованию потоков между звеньями.

В подразделе 2.5 выполнена энтропийная диагностика как количественное дополнение к структурному анализу. Показано, что при выбранной дискретизации и принятой процедуре расчёта энтропийный показатель характеризует структурную сложность распределения наблюдаемых отклонений и позволяет сопоставлять конфигурации распределений по различным блокам данных. Подчёркнуто, что энтропийная оценка в рамках второй главы используется как диагностическая характеристика структуры распределения отклонений и не включается в состав целевых функций оптимизационной модели.

В подразделе 2.6 выполнено прогнозирование объёмов добычи угольной продукции компанией China Coal на ближайший период с учётом неопределённости и вариативности параметров. Полученные прогнозные оценки используются для задания исходных параметров и допустимых сценарных границ при последующем построении модели.

Таким образом, во второй главе обоснованы методологические положения и сформирована исходная параметрическая база, необходимые для дальнейшей формализации производственно-логистической системы угольной компании Китая. Полученные результаты обеспечивают переход от качественного и структурного анализа объекта к построению динамической многокритериальной модели его функционирования, разработка которой осуществляется в третьей главе диссертации.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УГОЛЬНОЙ КОМПАНИИ КИТАЯ

Результаты второй главы обеспечили переход от описательного анализа объекта к обоснованию методов его исследования и параметризации. Выполненные структурный анализ производственно-логистической системы, оценка параметрической вариативности и прогнозирование ключевых параметров позволили установить состав основных подсистем, выявить структурные ограничения и определить исходные числовые условия, необходимые для последующего моделирования. Вместе с тем, на данном этапе полученные результаты ещё не образуют единой математической конструкции, задающей согласованные режимы функционирования производственно-логистической системы на дискретном горизонте планирования.

В третьей главе представлена динамическая многокритериальная модель производственно-логистической системы China Coal, в которой процессы добычи, переработки, транспортировки, формирования запасов и отгрузки продукции рассматриваются как взаимосвязанные подсистемы единой системы потоков и состояний. Принципиальное значение в данной постановке имеют учёт временной поэтапной связанности запасов, описание ограничений по мощностям и пропускной способности, а также технологическая параметризация переработки, связывающая выпуск товарных марок с входными потоками и качественными характеристиками сырья. Тем самым в главе формируется математическая основа дальнейшей вычислительной реализации модели и построения множества Парето-оптимальных режимов функционирования производственно-логистической системы, результаты которых рассматриваются в четвёртой главе.

3.1 Декомпозиция динамических процессов функционирования производственно-логистической системы

Производственно-логистическая система China Coal формализуется как сложная динамическая система потоков и состояний, в которой материальные перемещения и преобразования угля осуществляются по контуру «добыча — переработка — транспортировка — потребители», а допустимость режимов функционирования задаётся совокупностью производственных, логистических и качественных ограничений. В отличие от статических однопериодных моделей, решения периода t определяют состояние системы в периоде $t+1$ через балансовые соотношения и ограничения пропускной способности. Следовательно, рассматриваемый объект обладает состоянием, инерцией и временной поэтапной связанностью, что требует формализации не только потоков, но и параметров накопления ресурсов во времени.

Формализация выполняется в дискретном времени, где каждый период соответствует принятому шагу планирования. Состояние системы в момент t определяется совокупностью запасов и доступных мощностей, сформированных решениями предыдущих периодов. Решения периода t интерпретируются как управляющие воздействия на конфигурацию потоков, тогда как состояние периода $t+1$ возникает как результат балансовых соотношений и ограничений пропускной способности. Тем самым обеспечивается причинно-следственная связка «решение \rightarrow состояние \rightarrow следующее решение», определяющая динамический характер постановки и отличающая модель от статических однопериодных схем. Кроме того, технологическая динамика переработки учитывается через зависимость выпусков марок от входного потока и качественных характеристик сырья; прежде всего от зольности соответствующие соотношения задаются в виде регрессионной параметризации по обогащательным фабрикам.

Структурно сеть описывается множествами узлов и потоков. Пусть i — индекс шахт, j — индекс перерабатывающих узлов (обогащательных фабрик), k — индекс потребителей, l — индекс типов товарного угля (при необходимости исходный уголь выделяется отдельным состоянием), а t — индекс периода планирования. Для каждого производственного узла задаются параметры мощности и допустимые диапазоны изменения режимов, для транспортного контура — предельная пропускная способность по направлениям и (или) агрегированная транспортная мощность, для складских элементов — ёмкости хранения и начальные состояния. Такая система параметров обеспечивает однозначное задание допустимой области режимов и воспроизводимость численной реализации модели.

Ключевым элементом динамики выступает параметр состояния, отражающий накопление и перераспределение ресурса во времени. Для шахт вводится переменная запасов исходного угля на конец периода t , обновляемая по балансовому соотношению «начальные запасы + добыча – отгрузка/подача на переработку». Аналогичные состояния могут быть заданы для промежуточных узлов (складов, терминалов, узлов смешения), если их наличие существенно влияет на структуру потоков и допустимость режимов в последующих периодах. Введение состояния принципиально для корректного описания инерции системы: при ограниченной пропускной способности логистического контура невыполненный перенос ресурса не исчезает, а аккумулируется в запасах и тем самым изменяет пространство допустимых решений на следующих шагах планирования.

Материальные потоки внутри сети задаются переменными перемещения между подсистемами. Потоки «шахта \rightarrow фабрика» характеризуют объёмы подачи исходного угля на переработку, потоки «фабрика \rightarrow потребитель» — объёмы отгрузки товарного угля по типам, а транспортные ограничения фиксируют допустимые объёмы перемещения либо по направлениям, либо агрегировано по транспортному контуру. Для каждого узла формируются ограничения

мощности: добыча ограничена производственной мощностью шахты, переработка — мощностью фабрики, перевозки — транспортной пропускной способностью. Балансовые соотношения обеспечивают сохранение материального потока при переходе между узлами и задают согласованность добычи, переработки, складирования и отгрузки в рамках единого динамического контура.

Особое значение имеет учёт требований потребителей к качественным характеристикам поставок. В модели задаются нормативные параметры (например, по зольности), а также характеристики качества исходного и переработанного угля, что позволяет связать физическую конфигурацию потоков с условиями выполнения заказов. Качественные параметры включаются в модель не декларативно, а как инженерные ограничения режима функционирования: при несоответствии нормативам допустимая область решений сужается, и система вынуждена перераспределять потоки между узлами, корректировать структуру выпуска марок или изменять интенсивность переработки. Тем самым качественные требования выступают фактором структурной трансформации потоковой конфигурации.

Сформированное описание узлов, потоков, параметров состояния и ограничений задаёт основу для построения полной динамической многокритериальной постановки. Далее на этой основе уточняется система ограничений по подсистемам и вводится критериальная часть модели, в рамках которой режимы функционирования оцениваются через интегральный показатель ресурсной результативности и показатель логистической устойчивости и выполнения заказов.

3.2 Формализация подсистем, параметров и ограничений производственно-логистической системы

В целях дальнейшей формализации динамической многокритериальной модели производственно-логистической системы угольной компании необходимо задать единый и внутренне согласованный набор множеств, параметров и управляемых переменных, которые описывают архитектуру сети и режим её функционирования во времени. Данный набор обеспечивает строгое соответствие между структурной схемой производственно-логистической системы, выделенной в предыдущем подразделе, и математической постановкой, представленной далее в виде векторной целевой функции и системы ограничений. Принципиально важно, что переменные модели отражают не только мгновенные потоки, но и параметры состояния системы, поскольку решения в периоде t формируют доступные ресурсы и ограничения в периоде $t+1$ через динамику запасов и загрузку производственно-логистических мощностей.

В таблице 29 приведены используемые множества, исходные параметры и основные управляемые переменные. Для унификации терминологии в рамках диссертации показатель

выполнения заказов трактуется как показатель логистической устойчивости и выполнения заказов, а ресурсно-эквивалентная составляющая целевого блока далее интерпретируется через интегральный показатель ресурсной результативности, формируемый на основе удельных затрат, ценовых параметров и ресурсных ограничений. Использование относительных (нормированных) показателей позволяет избежать масштабного эффекта и сопоставлять режимы функционирования по периодам и сценарным условиям.

Таблица 29 — Основные параметры и переменные модели производственно-логистической системы угольной компании (составлено автором)

Обозначение	Описание	Обозначение	Описание
i	Индекс шахт, $i = 1, 2, \dots, I$	V_i' (млн т)	Максимальная ёмкость склада исходного угля шахты i
j	Индекс обогатительных фабрик, $j = 1, 2, \dots, J$	E_{kl}^t (млн т)	Спрос клиента k на уголь l в период t
l	Индекс видов товарного угля ($l = 1, 2, \dots, L$; исходный уголь обозначен как $l = 0$)	p_{kl}^t (юань/т)	Цена покупки угля l клиентом k в период t
k	Индекс клиентов, $k = 1, 2, \dots, K$	F_{kl} (%)	Стандарт зольности угля l , требуемый клиентом k
t	Индекс временных периодов ($t = 1, 2, \dots, T$; при ежемесячном планировании $T = 12$, при поквартальном — $T = 4$)	θ_k	Весовой коэффициент клиента k
XN_i (%)	Зольность исходного угля шахты i	γ_{k1}, γ_{k2}	Веса количества и качества для клиента k
A_i (млн т)	Производственная мощность шахты i за период	ρ_{kl}	Весовой коэффициент угля l для клиента k
H_{jl} (%)	Зольность товарного угля l , производимого фабрикой j	X_i^t (млн т)	Объём добычи угля шахтой i в период t
B_j (млн т)	Мощность обогатительной фабрики j	Y_j^t (млн т)	Объём угля, поступающего на переработку на фабрику j в период t
C_{jl} (юань/т)	Затраты на переработку исходного угля на фабрике j	L_{jl}^t (млн т)	Объём товарного угля l , произведённого фабрикой j в период t
YN_j (%)	Зольность исходного угля, поступающего на фабрику j	AN_{kl}^t (%)	Фактическая зольность угля l , поставляемого клиенту k в период t
α (млн т)	Общая транспортная мощность цепочки за период	X_{ij}^t (млн т)	Объём угля, перевезённого от шахты i к фабрике j в период t
S_{ij} (юань/т)	Стоимость перевозки угля от шахты i до фабрики j	Q_{kl}^t (млн т)	Объём угля l , поставляемого клиенту k в период t
C_{i0} (юань/т)	Себестоимость добычи исходного угля на шахте i	V_i^t (млн т)	Запасы исходного угля шахты i на конец периода t
C_{l2} (юань/т)	Затраты на хранение угля l за период	Z_{jkl}^t (млн т)	Объём угля l , реализованный фабрикой j клиенту k в период t

Продолжение таблицы 29

Обозначение	Описание	Обозначение	Описание
V_i^0 (млн т)	Начальные запасы исходного угля на шахте i	Z_{jk0}^t (млн т)	Объём исходного угля, реализованный шахтой i клиенту k в период t
R_{jl}^0 (млн т)	Начальные запасы товарного угля l на фабрике j	D_{kl}^t (%)	Степень удовлетворения заказа клиента k по углю l в период t
R'_{jl} (млн т)	Максимальная ёмкость склада товарного угля l на фабрике j	-	-

Формализованная модель внутренней цепи поставок задаётся как совокупность балансовых, технологических, инфраструктурных и качественных ограничений, которые определяют допустимую область режимов функционирования системы в дискретном времени $t = 1, \dots, T$. Ограничения вводятся таким образом, чтобы описывать межпериодную связанность через состояние запасов и обеспечивать согласование потоков между подсистемами добычи, переработки, транспортировки, складирования и отгрузки.

В подсистеме добычи производственный режим задаётся ограничением по мощности шахт. Для каждого узла добычи i и периода t соответствующее условие записывается в виде формулы (12):

$$0 \leq X_i^t \leq A_i, \forall i, t, \quad (12)$$

где X_i^t — объём добычи на шахте i в период t ;

A_i — доступная производственная мощность шахты за период.

Связь добычи с отгрузкой рядового угля на фабрики и прямой отгрузкой потребителям задаётся материальным балансом узла добычи с учётом межпериодного состояния запасов. Указанное соотношение имеет вид (13):

$$V_i^t = V_i^{t-1} + X_i^t - \sum_{j=1}^J X_{ij}^t - \sum_{k=1}^K Z_{ik0}^t, \forall i, t, \quad (13)$$

где V_i^t — запас рядового угля на конец периода t на шахте i ;

V_i^{t-1} — запас рядового угля на конец предыдущего периода;

X_{ij}^t — перевозка рядового угля от шахты i к фабрике j в период t ;

Z_{ik0}^t — прямая отгрузка рядового угля потребителю k с шахты i в период t , если в модели допускается прямой канал поставки.

Для исключения недопустимых режимов хранения запас на шахте ограничивается снизу и сверху. Это условие задаётся формулой (14):

$$0 \leq V_i^t \leq V'_i, \forall i, t, \quad (14)$$

где V'_i — ёмкость склада рядового угля на шахте i .

Начальное состояние запасов на шахтах считается заданным и согласованным с исходными данными. Для корректности балансов должно выполняться условие (15):

$$V_i^0 \geq 0. \quad (15)$$

В транспортной подсистеме перевозки между звеньями системы ограничиваются агрегированным ограничением пропускной способности транспортного контура. В минимальной форме соответствующее ограничение записывается в виде формулы (16):

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J X_{ij}^t \leq \alpha, \forall t, \quad (16)$$

где α — допустимый объём перевозок в период t для внутренней сети.

При необходимости детализации узких мест транспортного контура параметр α может задаваться по группам направлений или по отдельным узлам, однако базовая постановка фиксирует системный уровень транспортной пропускной способности, согласованный с результатами структурной диагностики сети.

Подсистема переработки определяется балансом входного потока и выпуском марок товарного угля на фабрике. Суммарный вход рядового угля на фабрику j в период t задаётся формулой (17):

$$Y_j^t = \sum_{i=1}^I X_{ij}^t, \forall j, t, \quad (17)$$

где Y_j^t — объём рядового угля, поступившего на фабрику j в период t .

Переработка ограничивается производственной мощностью фабрики. Соответствующее условие записывается в виде формулы (18):

$$0 \leq Y_j^t \leq B_j, \forall j, t, \quad (18)$$

где B_j — производственная мощность обогатительной фабрики за период.

Выпуск марок товарного угля описывается распределением переработанного объёма по маркам l . Базовое ограничение задаётся формулой (19):

$$\sum_{l=1}^L L_{jl}^t \leq Y_j^t, \forall j, t. \quad (19)$$

Если в модели используется фиксированная технологическая структура выхода, то соотношение (19) может быть уточнено до зависимости вида (20):

$$L_{jl}^t = \eta_{jl} Y_j^t \quad (20)$$

где η_{jl} — коэффициент выхода продукции марки l на фабрике j .

Состояние запасов на фабриках формализуется через межпериодный баланс по каждой марке l . Указанное соотношение записывается в виде формулы (21):

$$R_{jl}^t = R_{jl}^{t-1} + L_{jl}^t - \sum_{k=1}^K Z_{jkl}^t, \forall j, l, t, \quad (21)$$

где R_{jl}^t — запас продукции марки l на фабрике j на конец периода t ;

R_{jl}^{t-1} — запас той же марки на конец предыдущего периода;

Z_{jkl}^t — отгрузка продукции марки l потребителю k с фабрики j в период t .

Для допустимости режимов хранения вводится ограничение ёмкости складов, задаваемое формулой (22):

$$0 \leq R_{jl}^t \leq R'_{jl}, \forall j, l, t, \quad (22)$$

где R'_{jl} — максимально допустимый объём хранения продукции марки l на фабрике j .

Начальные запасы R_{jl}^0 считаются заданными и неотрицательными.

Связь между отгрузкой по узлам и агрегированной поставкой потребителю задаётся уравнением консолидации. В общем виде оно записывается формулой (23):

$$Q_{kl}^t = \sum_{j=1}^J Z_{jkl}^t + Z_{ikl}^t, \forall k, l, t, \quad (23)$$

где Q_{kl}^t — совокупный объём поставки продукции марки l потребителю k в период t ;

Z_{jkl}^t — отгрузка продукции марки l потребителю k с фабрики j в период t ;

Z_{ikl}^t — прямая поставка продукции марки l потребителю k со стороны добычи, если такой канал допускается моделью.

Если прямые поставки со стороны добычи не предусмотрены, в формуле (23) сохраняется только сумма по фабрикам.

Поставка ограничивается спросом, то есть заявкой потребителя. Это условие задаётся формулой (24):

$$0 \leq Q_{kl}^t \leq E_{kl}^t, \forall k, l, t, \quad (24)$$

где E_{kl}^t — заявка потребителя k на продукцию марки l в период t .

Требования к качеству поставок формализуются как условия соответствия фактических характеристик продукции нормативам потребителя. Для показателя зольности это условие имеет вид (25):

$$AH_{kl}^t \leq F_{kl}, \forall k, l, t, \quad (25)$$

где AH_{kl}^t — фактическое значение показателя качества продукции марки l , поставляемой потребителю k в период t ;

F_{kl} — допустимый норматив качества, в частности зольности, для продукции марки l , установленный потребителем k .

Если качество формируется смешением потоков из разных фабрик или источников, то величина AH_{kl}^t выражается через взвешенное среднее по источникам поставки;

соответствующая связь задаётся в модели отдельно и обеспечивает технологическую интерпретируемость показателя качества.

Показатель выполнения заказов вводится как нормированная характеристика уровня выполнения заявок в каждом периоде и по каждой марке. Он определяется формулой (26):

$$D_{kl}^t = \frac{Q_{kl}^t}{E_{kl}^t}, \forall k, l, t, \quad (26)$$

где D_{kl}^t — уровень выполнения заявки потребителя k по продукции марки l в период t .

Соотношение (26) используется при условии $E_{kl}^t > 0$. В случаях, когда для некоторых сочетаний (k, l, t) заявка равна нулю, показатель D_{kl}^t не рассчитывается и исключается из агрегирования.

Для последующего использования в качестве системного показателя логистической устойчивости и выполнения заказов агрегирование выполняется через веса потребителей и марок. Соответствующее выражение записывается (27):

$$\mu = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L w_{kl} D_{kl}^t, \quad (27)$$

где μ — интегральный показатель логистической устойчивости и выполнения заказов;

w_{kl} — весовой коэффициент, отражающий приоритетность заявки по направлению (k, l) .

Для весовых коэффициентов должно выполняться условие нормировки, задаваемое соотношением (28):

$$w_{kl} \geq 0, \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L w_{kl} = 1. \quad (28)$$

Нормировка весов может также выполняться по каждому периоду в зависимости от принятой методики. Такая конструкция позволяет интерпретировать μ как интегральную оценку степени выполнения заявок с учётом структуры спроса, не сводя показатель к денежной интерпретации и сохраняя инженерный смысл связки «выполнение — качество — режим».

Для обеспечения корректности вычислительной постановки все потоковые переменные и переменные запасов задаются в допустимых диапазонах и принимают только неотрицательные значения. Указанное условие записывается формулой (29):

$$X_i^t, X_{ij}^t, Y_j^t, L_{jl}^t, Z_{jkl}^t, Q_{kl}^t, V_i^t, R_{jl}^t \geq 0, \forall i, j, k, l, t. \quad (29)$$

Неотрицательность в сочетании с ограничениями мощностей и ёмкостей обеспечивает физическую реализуемость режимов и исключает формально допустимые, но технологически бессмысленные решения.

Тем самым система ограничений задаёт замкнутую структуру «решение → состояние → следующее решение», где межпериодные связи реализуются через балансы запасов на шахтах и фабриках, а логистическая устойчивость и выполнение заказов описываются через

нормированные показатели D_{kl}^t и агрегированный показатель μ . В следующем подразделе на этой основе формируется векторная цель оптимизационной постановки и уточняется структура интегрального показателя ресурсной результативности U , используемого совместно с μ при построении Парето-оптимальных режимов функционирования системы.

3.3 Оценка структуры допустимого множества Парето-оптимальных решений и требуемых вычислительных ресурсов для моделирования

Построенная динамическая многокритериальная модель производственно-логистической системы задаёт режимы её функционирования как совокупность согласованных решений по добыче, переработке, перевозкам между звеньями системы, отгрузке продукции и управлению запасами в дискретном времени. В отличие от статических однопериодных постановок, рассматриваемый объект характеризуется временной поэтапной связанностью решений через параметры состояния, прежде всего запасы угля на шахтах и обогатительных фабриках, вследствие чего допустимая область решений формируется не как совокупность независимых состояний по отдельным периодам, а как результат последовательного изменения потоков, запасов и ограничений во времени [7, 17, 102]. Поэтому для корректной интерпретации вычислительных свойств модели необходимо явно выделить допустимое множество и рассмотреть его структуру с учётом динамики состояния и топологии сети.

В настоящем подразделе анализ допустимого множества имеет методологическое назначение: он фиксирует, какие свойства области определяют требования к вычислительной процедуре построения множества Парето-оптимальных режимов, и тем самым обеспечивает логический переход от формализованных ограничений (п. 3.2) к целевой постановке и стратегии решения в последующих подразделах.

Множество допустимых решений обозначается как Ω и представляет собой совокупность всех векторов управляемых переменных x , удовлетворяющих ограничениям модели. В обобщённой форме допустимое множество задаётся стандартной записью (30):

$$\Omega = \{ x \mid h(x) = 0, g(x) \leq 0, x \geq 0 \}, \quad (30)$$

где Ω — множество допустимых решений;

x — вектор управляемых переменных, включающий потоковые переменные и переменные состояния, заданные по периодам.

$h(x) = 0$ — совокупность балансовых соотношений и уравнений консолидации потоков между подсистемами;

$g(x) \leq 0$ — совокупность ограничений мощностей, пропускной способности транспортного контура, ёмкостей хранения, спросовых границ и требований к качеству;

$x \geq 0$ — условие неотрицательности переменных, обеспечивающее физическую реализуемость режимов и исключающее технологически бессмысленные решения.

Такая формализация позволяет рассматривать Ω как инженерно корректную область допустимых режимов, в которой каждое решение соответствует реализуемой конфигурации потоков и состоянию системы, согласованную с инфраструктурными и технологическими границами.

Структура Ω определяется совместным действием двух типов связей: топологических связей сети и динамических связей состояния. Топологические связи задаются тем, что потоки между узлами не являются независимыми: добыча на шахтах ограничивает доступный объём подачи на переработку и прямые отгрузки, переработка на фабриках ограничивает выпуск марок, а отгрузки потребителям ограничены как спросом, так и транспортной пропускной способностью. Динамические связи состояния проявляются в том, что часть ресурса переносится между периодами в форме запасов; тем самым решения в периоде t изменяют состояние в периоде $t+1$ и воздействуют на допустимость и характер режимов последующих периодов. В результате Ω формируется не как простое декартово произведение однопериодных областей, а как связанная область, где допустимость режимов определяется цепочкой балансов «решение \rightarrow состояние \rightarrow следующее решение», что принципиально важно для корректного анализа режимов функционирования системы на горизонте планирования.

Указанная временная поэтапная связанность решений означает, что локально допустимое решение, найденное для отдельного периода при фиксированных параметрах, не гарантирует глобальной допустимости на всём горизонте планирования: любое изменение запасов или загрузки узлов в периоде t изменяет множество допустимых решений в периоде $t+1$ и тем самым влияет на структуру множества Ω в целом.

С вычислительной точки зрения существенным свойством Ω является её высокая размерность и потенциальная сложность геометрии. Размерность задачи определяется числом узлов сети, числом марок и числом периодов; при детальной декомпозиции на шахты, фабрики и потребителей число переменных растёт пропорционально $|I| \cdot |J| \cdot T$ для межузловых перевозок и $|J| \cdot |K| \cdot |L| \cdot T$ для распределения отгрузок по направлениям, а также включает динамические переменные запасов, обеспечивающие межпериодную связанность. Ограничения мощности и пропускной способности образуют многомерные «срезы» допустимой области, тогда как балансовые равенства задают жёсткую структуру согласования подсистем.

При этом структура множества Ω может существенно усложняться под воздействием технологических зависимостей в подсистеме переработки, включая нелинейные или кусочно-линейные зависимости выхода марок продукции от качества входного потока, а также логических условий технологического характера. Это создаёт предпосылки к неоднородности

допустимой области решений и, как следствие, к сложной структуре фронта компромиссов. Следовательно, свойства множества Ω допускают ситуации, при которых классические методы, ориентированные на поиск единственного решения при предварительном сведении задачи к одному критерию, утрачивают информативность с точки зрения анализа компромиссных режимов функционирования системы.

Ещё одной особенностью является то, что критерии векторной цели (U, μ) формируются на допустимом множестве Ω как оценки качества режима функционирования, а не как самостоятельные ограничения. Это означает, что задача не сводится к поиску «единственного оптимума», а ориентирована на построение множества Парето-оптимальных решений, отражающих структуру компромисса между ресурсной результативностью и логистической устойчивостью выполнения заказов. С вычислительной точки зрения это требует применения процедуры, способной работать со сложной структурой допустимой области Ω , обеспечивать формирование множества Парето-оптимальных решений и корректно отражать структуру фронта Парето, в том числе при неоднородном распределении допустимых режимов по его отдельным участкам.

Анализ допустимого множества показывает, что для вычислительной реализации модели необходимы методы многокритериальной оптимизации. В последующих подразделах уточняется математическая постановка задачи, формируется система показателей оценки и обосновывается вычислительная стратегия получения Парето-оптимальных режимов функционирования производственно-логистической системы.

3.4 Обоснование системы исходных данных для моделирования процесса функционирования модели производственно-логистической системы

Ранее (п. 3.1–3.3) производственно-логистическая система China Coal была формализована как сложная динамическая система потоков и состояний, в которой допустимость режимов функционирования определяется балансовыми, мощностными, складскими, транспортными и объёмно-качественными ограничениями. Вместе с тем, для перехода к полной математической постановке задачи недостаточно задать только структуру связей и систему ограничений. Необходимо обосновать состав исходных данных и параметров модели, определить показатели её функционирования и на этой основе сформировать векторную целевую функцию, позволяющую оценивать и сопоставлять режимы функционирования производственно-логистической системы.

3.4.1 Обоснование исходных данных и параметров функционирования модели производственно-логистической системы

Для перехода от общей структурной формализации производственно-логистической системы к её математическому моделированию необходимо обосновать состав исходных данных и параметров, задающих режимы функционирования модели. В рассматриваемой постановке исходные данные должны обеспечивать описание не только объёмных характеристик потоков, но и технологических, качественных и организационно-структурных особенностей функционирования подсистем добычи, переработки, хранения, транспортировки и отгрузки продукции.

Особое значение в данной связи имеет корректное описание подсистемы переработки. Если ограничиться только балансовыми соотношениями и ограничениями по мощностям, то выпуск товарных марок угля в модели фактически задаётся как свободная переменная, что ослабляет технологическую интерпретируемость постановки. Поэтому для включения технологических связей переработки в динамическую модель необходимо задать взаимосвязь между входными параметрами переработки и выпуском целевого продукта на каждом перерабатывающем узле.

В рамках принятой формализации обогатительные фабрики рассматриваются как узлы подсистемы переработки $j \in J$, а выпуск товарных марок L_{jl}^t трактуется как результат преобразования входного потока Y_j^t при заданных качественных характеристиках сырья. Тем самым технологическая динамика переработки описывается не декларативно, а через параметризуемое соотношение, обеспечивающее связность «вход переработки → выпуск → запасы / отгрузка» в дискретном времени.

В общем виде технологическая связь подсистемы переработки может быть представлена как зависимость выхода товарных марок от объёма входного потока переработки и качества исходного сырья. Соответствующая зависимость задаётся формулой (31):

$$L_{jl}^t = \alpha_{jl}Y_j^t - \beta_{jl}YH_j^t + \sum_{m \neq l} \gamma_{jlm}L_{jm}^t. \quad (31)$$

где L_{jl}^t — выпуск продукции марки l на фабрике j в период t ;

Y_j^t — объём переработки на фабрике j в период t ;

YH_j^t — показатель качества входного сырья на фабрике j в период t ;

α_{jl}, β_{jl} — технологические коэффициенты, определяющие влияние объёма переработки и качества сырья на выпуск продукции марки l ;

γ_{jlm} — коэффициент внутрифабричной взаимосвязи выпусков различных марок;

$\sum_{m \neq l} \gamma_{jlm} L_{jm}^t$ — перекрёстный компонент, отражающий перераспределение выходов между различными марками продукции в рамках одного технологического цикла.

Коэффициент α_{jl} характеризует технологическую отдачу переработки по марке l , а коэффициент β_{jl} — чувствительность выпуска к изменению качества входного сырья. Перекрёстный компонент $\sum_{m \neq l} \gamma_{jlm} L_{jm}^t$ допускает многопродуктовое описание переработки и в общем случае позволяет учитывать взаимосвязанность выходов различных марок продукции в пределах одного перерабатывающего узла.

Вместе с тем, корректная идентификация параметров γ_{jlm} требует наличия наблюдений по нескольким выходным потокам. Поскольку в используемой эмпирической базе наблюдения сформированы только по выпуску концентрата, в настоящем исследовании перекрёстный компонент рассматривается как обобщение многопродуктового случая, тогда как в прикладных расчётах для каждой фабрики используется редуцированная двухфакторная зависимость «входной поток — качество — выпуск». Указанная зависимость задаётся формулой (32):

$$\hat{L}_j^t = \hat{\alpha}_j Y_j^t - \hat{\beta}_j Y H_j^t, \quad (32)$$

где \hat{L}_j^t — расчётный выпуск концентрата на фабрике j в период t ;

$\hat{\alpha}_j$ — оценочный коэффициент, характеризующий технологическую отдачу переработки при прочих равных условиях;

$\hat{\beta}_j$ — оценочный коэффициент, характеризующий чувствительность выпуска к изменению зольности входного сырья.

Перед представлением производственно-технических параметров уточняется принятая в модели классификация товарных марок угля. Индекс l обозначает тип товарного угля: $l = 0$ — исходный (рядовой) уголь, $l = 1$ — коксующийся, $l = 2$ — энергетический, $l = 3$ — обогащённый или смешанный уголь. Для отдельных шахт и перерабатывающих узлов набор l может быть неполным, что отражает специализацию производственного профиля и наличие либо отсутствие обогащения; в таблицах такие позиции отмечены прочерком. В дальнейшем данная классификация используется при задании параметров качества H_{jl} , спроса H_{jl} и ограничений по качеству F_{kl} в расчётной постановке.

Для включения технологических связей переработки в динамическую модель производственно-логистической системы требуется не только зафиксировать структуру перерабатывающих узлов в принятой системе обозначений, но и обеспечить их однозначное соответствие фактическим производственным районам и профилям выпуска. В рамках настоящего исследования перерабатывающие узлы представлены обогатительными фабриками $j \in J$, сопоставленными с соответствующими шахтными районами и характеристиками выпуска, что обеспечивает согласование между подсистемой переработки и эмпирическими

наблюдениями по технологическим показателям. Модельное соответствие шахтных районов и узлов переработки представлено в таблице 30.

Таблица 30 — Модельное соответствие шахтных районов и узлов переработки (составлено автором по данным годовых отчётов *China Coal*)

Шахта	Основные виды угля (русский термин)	Число фабрик	Обозначения фабрик
Антайбао	исходный, коксующийся (1/3), энергетический, обогащённый	2	I, II
Ванцзялин	исходный, коксующийся, энергетический, обогащённый	1	III
Яоцяо	исходный, коксующийся/газовый, обогащённый	1	IV
Сюйчжуан	исходный, газовый, обогащённый	1	V
Налинхэ №2	исходный, энергетический (высококалорийный), обогащённый	2	VI, VII
Мудучайден	исходный, энергетический, обогащённый	1	VIII
Наньлян	исходный, коксующийся/газовый, обогащённый	1	IX
Илань №3	исходный (без обогащения)	0	—
Даньаньху №10	исходный, энергетический, обогащённый	2	X, XI
Вэйцзыгоу	исходный, энергетический, смешанный (обогащённый)	1	XII

Представленная структура показывает, что перерабатывающие узлы распределены по нескольким шахтным районам и различаются по составу выпускаемой продукции. Это обстоятельство имеет принципиальное значение для моделирования, поскольку определяет набор допустимых потоков, конфигурацию связей между добычей и переработкой, а также параметры качества, используемые далее при задании технологических и качественных ограничений.

Эмпирическая база оценивания сформирована по месячным данным 2023–2024 гг. для фабрик, по которым доступны согласованные ряды входного потока переработки, качественных характеристик сырья и выпуска концентрата. В качестве зависимой переменной принята величина выпуска концентрата (тыс. т), а в качестве объясняющих переменных — входной поток переработки (тыс. т) и зольность входного сырья (%). Оценивание выполнялось на выборке из 24 наблюдений для каждой фабрики, что обеспечивает воспроизводимую оценку коэффициентов технологической параметризации. Исходные месячные данные приведены в Приложении Б (таблицы Б.1–Б.12).

В рамках доступной эмпирической базы наблюдения сформированы по выпуску концентрата как единственной целевой марки, вследствие чего перекрёстные члены статистически не идентифицируются и в оценивании не используются. По этой причине для каждой фабрики применяется редуцированная форма технологической параметризации выпуска,

позволяющая непосредственно связать объём переработки и качество сырья с выпуском концентрата.

Результаты оценивания коэффициентов регрессионной параметризации выходов обогатительных фабрик приведены в таблице 31.

Таблица 31 — Оценочные коэффициенты регрессионной параметризации выходов обогатительных фабрик (по данным автора)

Фабрика (j)	Объект	$\hat{\alpha}_j$	$\hat{\beta}_j$	R^2	DW	F(2,21)	p
I	Антайбао (I)	0,652	5,12	0,973	1,88	401,3	<0,001
II	Антайбао (II)	0,639	4,76	0,964	1,73	322,5	<0,001
III	Ванцзялин (III)	0,684	4,87	0,968	1,91	355,6	<0,001
IV	Яоцяо (IV)	0,659	4,35	0,961	1,83	328,9	<0,001
V	Сюйчжуан (V)	0,648	4,72	0,968	1,89	365,8	<0,001
VI	Налинхэ №2 (VI)	0,661	4,93	0,975	1,91	418,5	<0,001
VII	Налинхэ №2 (VII)	0,672	5,07	0,978	1,94	437,2	<0,001
VIII	Мудучайден (VIII)	0,655	4,61	0,963	1,86	333,7	<0,001
IX	Наньян (IX)	0,639	4,28	0,954	1,79	307,2	<0,001
X	Даньяньху №10 (X)	0,661	4,35	0,967	1,90	349,6	<0,001
XI	Даньяньху №10 (XI)	0,666	4,52	0,967	1,88	349,1	<0,001
XII	Вэйцзыгоу (XII)	0,627	4,17	0,947	1,81	292,5	<0,001

Полученные оценки показывают, что для всех рассматриваемых фабрик регрессионные зависимости имеют устойчивый характер и могут быть использованы в качестве технологической параметризации подсистемы переработки. Высокие значения R^2 (0,947–0,978) свидетельствуют о том, что вариация выпуска в значительной степени объясняется масштабом переработки и качеством сырья, что соответствует инженерной природе процесса обогащения. Значения статистики Дарбина–Уотсона находятся вблизи 2, что указывает на отсутствие выраженной автокорреляции остатков и подтверждает пригодность уравнений для параметризации периодной динамической модели.

Для фабрик, по которым сформированы наблюдения, получены расчётные зависимости выпуска концентрата, используемые далее в качестве технологических соотношений в динамической модели. Указанные зависимости записываются в виде системы выражений (33):

$$\begin{aligned}
&\text{Антайбао (I): } \hat{L}_{t1} = 0,652Y_{t1} - 5,12Ash_{t1}, \\
&\text{Антайбао (II): } \hat{L}_{t2} = 0,639Y_{t2} - 4,76Ash_{t2},; \\
&\text{Ванцзялин (III): } \hat{L}_{t3} = 0,684Y_{t3} - 4,87Ash_{t3},; \\
&\text{Яоцяо (IV): } \hat{L}_{t4} = 0,659Y_{t4} - 4,35Ash_{t4}; \\
&\text{Сюйчжуан (V): } \hat{L}_{t5} = 0,648Y_{t5} - 4,72Ash_{t5}; \\
&\text{Налинхэ (VI): } \hat{L}_{t6} = 0,661Y_{t6} - 4,93Ash_{t6}; \\
&\text{Налинхэ (VII): } \hat{L}_{t7} = 0,672Y_{t7} - 5,07Ash_{t7}; \\
&\text{Мудучайден (VIII): } \hat{L}_{t8} = 0,655Y_{t8} - 4,61Ash_{t8}; \\
&\text{Наньлян (IX): } \hat{L}_{t9} = 0,639Y_{t9} - 4,28Ash_{t9},; \\
&\text{Даньаньху (X): } \hat{L}_{t10} = 0,661Y_{t10} - 4,35Ash_{t10}; \\
&\text{Даньаньху (XI): } \hat{L}_{t11} = 0,666Y_{t11} - 4,52Ash_{t11}; \\
&\text{Вэйцзыгоу (XII): } \hat{L}_{t12} = 0,627Y_{t12} - 4,17Ash_{t12},.
\end{aligned} \tag{33}$$

В инженерной интерпретации коэффициент $\hat{\alpha}_j$ характеризует технологическую отдачу переработки на фабрике j , а коэффициент $\hat{\beta}_j$ отражает чувствительность выпуска к ухудшению качества входного сырья. Тем самым регрессионная параметризация фиксирует не условную, а измеренную по данным зависимость «масштаб переработки \rightarrow выпуск» с поправкой на качество сырья.

Полученные коэффициенты $\hat{\alpha}_j$ и $\hat{\beta}_j$ интегрируются в подсистему переработки как технологические соотношения, связывающие входной поток Y_j^t , качество YN_j^t и выпуск L_j^t при формировании допустимого множества режимов функционирования производственно-логистической системы. Тем самым обоснование исходных данных и параметров функционирования модели обеспечивает переход от эмпирически наблюдаемого технологического поведения обогатительных фабрик к формализованной динамической постановке, используемой далее при разработке показателей, критериев и векторной целевой функции модели.

3.4.2 Разработка показателей и критериев функционирования модели производственно-логистической системы

Обоснование исходных данных и параметров функционирования модели позволяет перейти к разработке показателей, на основе которых оцениваются режимы функционирования производственно-логистической системы. В рассматриваемой постановке такие показатели должны отражать не только отдельные характеристики работы подсистем, но и согласованность функционирования системы в целом. Это обусловлено тем, что производственно-логистическая система угольной компании представляет собой сложную структуру взаимосвязанных потоков, в которой изменение режима добычи, переработки, транспортировки, хранения или отгрузки воздействует на состояние других звеньев и на итоговый результат функционирования системы.

Содержательно режим функционирования производственно-логистической системы должен оцениваться, по меньшей мере, с двух сторон. С одной стороны, требуется определить,

насколько рационально и результативно система использует имеющиеся производственные и инфраструктурные ресурсы. С другой стороны, необходимо оценить, насколько полно и устойчиво система обеспечивает выполнение объёмно-качественных требований потребителей на горизонте планирования. Следовательно, разработка показателей функционирования модели должна обеспечивать совместный учёт внутренних ресурсных характеристик системы и внешних требований к результатам её работы.

Первый показатель в данной постановке трактуется как интегральный показатель ресурсной результативности. Его назначение состоит в количественной оценке того, насколько согласованно система преобразует доступные ресурсы — мощности добычи, переработки, транспортную пропускную способность, складские ёмкости — в конечные материальные потоки. В отличие от частных стоимостных характеристик, этот показатель должен отражать не только результат реализации продукции, но и связанную с ним ресурсную нагрузку на основные звенья системы. Тем самым ресурсная результативность понимается не как изолированная денежная величина, а как интегральная характеристика режима функционирования, учитывающая соотношение между достигнутым выходным эффектом и затратами ресурсов на его обеспечение.

В прикладной интерпретации показатель ресурсной результативности должен быть чувствителен к изменениям в объёмах добычи, переработки и поставок, к характеру использования транспортной инфраструктуры, а также к накоплению запасов в системе. Для производственно-логистической системы угольной компании это имеет принципиальное значение, поскольку увеличение объёмов продукции не всегда сопровождается улучшением общего режима функционирования. Так, рост добычи при ограниченной переработке или пропускной способности транспорта может приводить к перегрузке отдельных звеньев, накоплению избыточных запасов и ухудшению согласованности потоков. Следовательно, соответствующий показатель должен фиксировать не только выходной эффект режима, но и степень ресурсной нагрузки, связанной с его достижением.

Второй показатель задаётся как показатель логистической устойчивости и выполнения заказов. Его назначение состоит в количественной оценке того, насколько полно и стабильно производственно-логистическая система обеспечивает выполнение требований потребителей по объёму поставок и соответствию качественных характеристик продукции установленным нормативам. В рассматриваемой задаче этот показатель имеет самостоятельное содержательное значение, поскольку выполнение заказов в угольной отрасли определяется не только объёмом отгрузки, но и соблюдением качественных параметров продукции, а также устойчивостью снабжения во времени.

В отличие от ресурсной результативности, характеризующей внутреннюю сторону функционирования системы, показатель логистической устойчивости и выполнения заказов

отражает её внешнюю результативность. Он должен учитывать, насколько полно удовлетворяются заявки различных категорий потребителей, насколько соблюдаются требования к качеству продукции и в какой мере достигается устойчивость снабжения в разрезе плановых периодов. Это особенно важно для производственно-логистической системы угольной компании, в которой изменения режимов добычи и переработки непосредственно влияют на структуру поставок, доступность отдельных марок продукции и возможность выполнения контрактных обязательств.

Необходимость совместного использования двух указанных показателей определяется противоречивостью требований к функционированию производственно-логистической системы. Режим, обеспечивающий более высокую ресурсную результативность, может сопровождаться ростом нагрузки на внутренние звенья, ухудшением структуры запасов или снижением устойчивости выполнения отдельных заявок. В свою очередь, стремление к максимальному удовлетворению требований потребителей может требовать перераспределения потоков, увеличения запасов, более интенсивного использования инфраструктуры и тем самым снижать ресурсную результативность системы. Следовательно, оценка режимов функционирования не может быть сведена к одному интегральному показателю без потери информации о характере компромисса между внутренними и внешними параметрами функционирования системы.

С методологической точки зрения это означает, что показатели функционирования модели должны разрабатываться как взаимодополняющие критериальные оценки. Первый из них отражает эффективность преобразования ресурсов в результирующие материальные потоки, второй — устойчивость выполнения внешних требований по объёму и качеству поставок. Их совместное использование позволяет перейти от одностороннего описания режима к более полному представлению о согласованности функционирования производственно-логистической системы на горизонте планирования.

Таким образом, в рамках модели формируется система показателей, отражающих две основные стороны функционирования производственно-логистической системы угольной компании: ресурсную результативность и логистическую устойчивость выполнения заказов. Разработка указанных показателей создаёт содержательную основу для последующего формирования векторной целевой функции, в которой оба критерия используются совместно для количественной оценки и сопоставления режимов функционирования системы.

3.4.3 Разработка векторной целевой функции и критериев оценки режимов функционирования модели производственно-логистической системы

Разработанные в подразделе 3.4.2 показатели функционирования производственно-логистической системы получают в настоящем подразделе формализованное выражение в виде

векторной целевой функции. Такой переход обусловлен тем, что оценка режимов функционирования системы не может быть сведена к одному интегральному показателю без потери информации о структуре противоречий между внутренними ресурсными параметрами и внешними требованиями к поставкам. В связи с этим оптимизационная постановка модели формируется как динамическая многокритериальная задача, ориентированная на построение множества допустимых компромиссных режимов функционирования производственно-логистической системы.

Первый компонент векторной цели задаётся как интегральный показатель ресурсной результативности U . В соответствии с содержательной интерпретацией, представленной в подразделе 3.4.2, данный показатель отражает, насколько согласованно система преобразует доступные производственные и инфраструктурные ресурсы в конечные материальные потоки. Формально показатель U записывается как агрегированная функция по периодам, включающая результирующий поток реализации и соответствующие ресурсные нагрузки по добыче, переработке, транспортировке и хранению. Указанное выражение имеет вид (34):

$$U = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L Q_{kl}^t P_{kl} - \sum_{i=1}^I X_i^t C_{i0} - \sum_{j=1}^J Y_j^t C_{j1} - \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I X_{ij}^t S_{ij} - \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L C_{l2} \frac{R_{jl}^t + R_{jl}^{t-1}}{2} - \sum_{i=1}^I C_{02} \frac{V_i^t + V_i^{t-1}}{2} \right]. \quad (34)$$

В данной записи член $\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L Q_{kl}^t P_{kl}$ фиксирует выходной эффект режима в виде реализованного потока на контуре потребителей, тогда как слагаемые, связанные с добычей, переработкой, внутрисистемной транспортировкой и хранением, отражают ресурсную нагрузку режима по ключевым операциям и узлам сети. Использование средних остатков запасов позволяет корректно учитывать складскую нагрузку в рамках дискретной периодной модели и согласуется с логикой временной поэтапной связанности состояний системы.

Второй компонент векторной цели задаётся как показатель логистической устойчивости и выполнения заказов μ . В соответствии с его содержательной интерпретацией, этот показатель характеризует степень выполнения требований потребителей по объёму поставок и соответствию качественных характеристик продукции установленным нормативам. Формально показатель μ записывается как агрегированная оценка по периодам и потребителям с учётом приоритетности направлений поставок и относительной значимости объёмного и качественного компонентов. Соответствующее выражение имеет вид (35):

$$\mu = \sum_{t=1}^T \sum_k \left(\theta_k \left(\gamma_{k1} \sum_{l=0}^L \rho_{kl} \frac{Q_{kl}^t}{E_{kl}^t} + \gamma_{k2} \sum_{l=0}^L \rho_{kl} \left(1 - \frac{AH_{kl}^t - F_{kl}}{F_{kl}} \right) \right) \right). \quad (35)$$

В данной записи нормированная величина $\frac{Q_{kl}^t}{E_{kl}^t}$ интерпретируется как уровень выполнения заявки по паре (k, l) в период t , а выражение имеет вид (36):

$$1 - \frac{AH_{kl}^t - F_{kl}}{F_{kl}}, \quad (36)$$

который характеризует степень соответствия качества продукции нормативу потребителя. Весовые коэффициенты ρ_{kl} задают структурную значимость марок угля в заявках потребителя, θ_k отражает приоритетность потребителя в системе поставок, γ_{k1} и γ_{k2} задают относительную значимость объёмного и качественного компонентов при агрегировании показателя μ .

Фактические качественные характеристики поставляемого потока определяются как средневзвешенные по источникам формирования поставки. Для товарных марок, поступающих от перерабатывающих узлов, используется выражение (37):

$$AH_{kl}^t = \frac{\sum_{j=1}^J Z_{jkl}^t H_{jl}}{\sum_{j=1}^J Z_{jkl}^t}, l = 1, \dots, L. \quad (37)$$

Для исходного угля, поставляемого непосредственно от добывающих звеньев, используется выражение (38):

$$AH_{k0}^t = \frac{\sum_{i=1}^I Z_{ik0}^t XH_i}{\sum_{i=1}^I Z_{ik0}^t}. \quad (38)$$

Тем самым показатель μ учитывает не только количественное выполнение заявок, но и фактическое качество поставляемой продукции, что особенно важно для производственно-логистической системы угольной компании, где изменения режимов добычи, переработки и маршрутизации потоков непосредственно влияют на возможность соблюдения качественных требований потребителей.

Векторная постановка по критериям U и μ отражает противоречивость требований к режимам функционирования производственно-логистической системы. Повышение ресурсной результативности при жёстких ограничениях по мощностям, транспортировке и запасам может сопровождаться ухудшением выполнения отдельных заявок, либо ростом отклонений по качеству в части направлений поставок. В то же время повышение устойчивости выполнения заказов при фиксированных ресурсах и инфраструктурных ограничениях требует перераспределения потоков, увеличения запасов и повышения нагрузки на отдельные звенья системы. Следовательно, искомым результатом является не единичное решение, а множество Парето-оптимальных режимов, позволяющее выбирать компромиссный вариант в зависимости от принятой политики планирования и сценарных условий.

Формально полная математическая постановка задачи оптимизации производственно-логистической системы в дискретном времени имеет вид (39):

$$\max (U(x), \mu(x)), x \in \Omega, \quad (39)$$

$$MAXU = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L Q_{kl}^t P_{kl} - \sum_{i=1}^I X_i^t C_{i0} - \sum_{j=1}^J Y_j^t C_{j1} - \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I X_{ij}^t S_{ij} \right. \\ \left. - \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L C_{l2} \frac{R_{jl}^t + R_{jl}^{t-1}}{2} - \sum_{i=1}^I C_{02} \frac{V_i^t + V_i^{t-1}}{2} \right],$$

$$MAX\mu = \sum_{t=1}^T \sum_k \left(\theta_k \left(\gamma_{k1} \sum_{l=0}^L \rho_{kl} \frac{Q_{kl}^t}{E_{kl}^t} + \gamma_{k2} \sum_{l=0}^L \rho_{kl} \left(1 - \frac{AH_{kl}^t - F_{kl}}{F_{kl}} \right) \right) \right),$$

$$\text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} X_i^t \leq A_i, Y_j^t \leq B_j, R_{jl}^t \leq R'_{jl}, V_i^t \leq V'_i, \\ L_{jl}^t = \mathbf{f}(Y_j^t, YH_j^t, \dots), \text{см. п. 3.4,} \\ Y_j^t = \sum_{i=1}^I X_{ij}^t, j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T, \\ X_i^t + V_i^{t-1} = \sum_{j=1}^J X_{ij}^t + \sum_{k=1}^K Z_{ik0}^t + V_i^t, i = 1, \dots, I, t = 1, \dots, T, \\ Q_{kl}^t = \sum_{j=1}^J Z_{jkl}^t, k = 1, \dots, K, l = 1, \dots, L, t = 1, \dots, T, \\ Q_{k0}^t = \sum_{i=1}^I Z_{ik0}^t, k = 1, \dots, K, t = 1, \dots, T, \\ \sum_{k=1}^K Z_{jkl}^t + R_{jl}^t = L_{jl}^t + R_{jl}^{t-1}, j = 1, \dots, J, l = 1, \dots, L, t = 1, \dots, T, \\ YH_j^t = \frac{\sum_{i=1}^I X_{ij}^t XH_i}{\sum_{i=1}^I X_{ij}^t}, j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T, \\ AH_{kl}^t = \frac{\sum_{j=1}^J Z_{jkl}^t H_{jl}}{\sum_{j=1}^J Z_{jkl}^t}, k = 1, \dots, K, l = 1, \dots, L, t = 1, \dots, T, \\ AH_{k0}^t = \frac{\sum_{i=1}^I Z_{ik0}^t XH_i}{\sum_{i=1}^I Z_{ik0}^t}, k = 1, \dots, K, t = 1, \dots, T, \\ X_i^t, X_{ij}^t, Y_j^t, L_{jl}^t, Z_{jkl}^t, Z_{ik0}^t, Q_{kl}^t, V_i^t, R_{jl}^t \geq 0. \end{array} \right.$$

3.5 Выводы по третьей главе

В третьей главе выполнено формализованное описание производственно-логистической системы China Coal Group как сложной динамической системы потоков и состояний, в которой временная поэтапная связанность режимов функционирования обеспечивается через параметры состояния — запасы угля на шахтах и фабриках. Это позволило задать причинно-следственную связку «решение → состояние → следующее решение» и тем самым перейти от статического представления производственно-логистических процессов к динамической постановке на горизонте планирования.

На основе единого набора индексов, параметров и управляемых переменных выполнена декомпозиция сети на подсистемы добычи, переработки, транспортировки, складирования и отгрузки продукции, а также сформирована система ограничений, задающая допустимую

область режимов функционирования в дискретном времени. Балансовые равенства и ограничения по мощностям, складским ёмкостям, пропускной способности и качественным требованиям обеспечили технологическую интерпретируемость модели и исключили формально допустимые, но физически нереализуемые режимы.

С учётом введённой системы ограничений выполнен анализ структуры допустимого множества и вычислительных свойств модели, что позволило обосновать требования к процедуре построения множества Парето-оптимальных режимов функционирования производственно-логистической системы.

Сформирована технологическая параметризация подсистемы переработки, обеспечивающая замыкание модели по контуру «вход переработки → выпуск марок → отгрузка/запасы». Для обогатительных фабрик получены устойчивые регрессионные зависимости выходов, связывающие объёмы выпуска товарных марок с входными потоками и качественными характеристиками сырья. Тем самым в модель введены технологические связи, позволяющие учитывать влияние качества входного угля на результаты переработки в каждом периоде планирования.

В подразделе 3.4 обоснованы состав исходных данных и параметры модели, разработаны показатели и критерии функционирования производственно-логистической системы, а также сформирована векторная целевая функция. Постановка задачи в части показателей оценки задана двумя взаимосвязанными показателями — ресурсной результативности и логистической устойчивости и выполнения заказов. Это позволило сформировать динамическую многокритериальную постановку задачи без предварительного сведения её к одному критерию и обеспечить анализ допустимых компромиссных режимов функционирования системы.

Таким образом, в третьей главе завершён переход от структурно-параметрического описания объекта к построению математической модели производственно-логистической системы угольной компании Китая. Сформулированная постановка обеспечивает описание, формализацию и исследование режимов функционирования системы и служит основой для вычислительной реализации модели, построения множества Парето-оптимальных решений и последующего анализа сбалансированных режимов в четвёртой главе.

ГЛАВА 4 ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УПРАВЛЕНИЮ ВНУТРЕННЕЙ ЦЕПЬЮ ПОСТАВОК CHINA COAL

Результаты первых трёх глав обеспечили переход от описательного анализа объекта к формализованной постановке задачи управления производственно-логистической системой China Coal. В третьей главе объект был представлен как сложная динамическая система потоков и состояний с заданными параметрами состояния, инженерными ограничениями и многокритериальной постановкой задачи, включающей показатели U и μ . В четвёртой главе осуществлена вычислительная реализация построенной модели, сформировано множество Парето-оптимальных решений и проведен анализ полученных режимов функционирования на горизонте планирования. На этой основе проведена оценка их реализуемости и сформированы практические рекомендации по согласованию добычи, переработки, транспортировки и отгрузки в производственно-логистической системе China Coal.

4.1 Методологические основы вычислительного эксперимента

В настоящей главе представлена реализация модели, разработанной в главе 3, на материалах корпорации China Coal. Описан переход от структурно-параметрического описания объекта (главы 1–2) к численному синтезу режимов функционирования внутренней цепи поставок на горизонте планирования.

Цель прикладного этапа состоит в получении множества Парето-оптимальных режимов функционирования системы и последующем выделении режима, который может быть непосредственно использован при согласовании добычи, переработки, транспортировки, складирования и отгрузки. Выбор выполняется по двум компонентам векторной цели: интегральному показателю ресурсной результативности U и показателю логистической устойчивости и выполнения заказов μ . Принципиально важно, что результат рассматривается не как единственная «оптимальная точка», а как поле допустимых компромиссов, позволяющее выбирать режим после построения фронта Парето без априорной скаляризации критериев (см. пп. 3.5–3.6).

Методическая основа вычислительного эксперимента определяется структурой модели, разработанной в главе 3, и включает три взаимосвязанных элемента. Первый элемент связан с динамическим характером постановки, задаваемым параметрами состояния, прежде всего, запасами на шахтах и обогатительных фабриках, что обеспечивает временную поэтапную связанность решений и причинно-следственную схему «решение \rightarrow состояние \rightarrow следующее решение» (пп. 3.1–3.2). Второй элемент образует допустимую область Ω , формируемую системой ограничений: балансовыми соотношениями потоков и запасов, ограничениями по

мощностям добычи и переработки, складским ёмкостям, пропускной способности транспортного контура, параметрам поставок и требованиям к качеству продукции (пп. 3.2–3.3). Третий элемент составляют технологические связи переработки, учитываемые через регрессионную параметризацию выходов обогатительных фабрик, связывающую выпуск марок продукции с входным потоком и качественными характеристиками сырья (п. 3.4). В совокупности это обеспечивает технологическую и структурную согласованность подсистемы переработки в составе динамической модели.

Численное решение задачи осуществляется как многокритериальная оптимизация на множестве решений с построением множества Парето-оптимальных решений. Для построения фронта Парето используется эволюционный алгоритм NSGA-II, поскольку он позволяет получать репрезентативное множество Парето-оптимальных альтернатив в условиях сложной структуры допустимой области, временной поэтапной связанности через параметры состояния и взаимосвязанной системы ограничений, обусловленной сетевой структурой и технологическими зависимостями переработки (см. п. 3.3 и п. 3.4.3). Реализация выполняется в среде MATLAB с использованием процедуры, обеспечивающей построение Парето-множества и его последующую обработку для выбора режима, соответствующего условиям функционирования системы на горизонте планирования.

Отдельное значение в главе придаётся проверке инженерной реализуемости полученных режимов. Наряду с представлением фронта Парето и интерпретацией выбранного решения выполняется контроль соблюдения ограничений модели: балансовых соотношений, временной поэтапной динамики запасов, мощностей добычи и переработки, транспортной пропускной способности, складских ёмкостей и требований к качеству поставок. Такой контроль оформляется в виде отчёта о выполнении ограничений и позволяет перейти от найденного решения к режиму, допустимому с точки зрения инженерной логики функционирования производственно-логистической системы.

4.2 Исходные данные для моделирования производственно-логистической системы China Coal

Построение модели производственно-логистической системы угольной компании China Coal опирается на систематизацию производственно-технических и рыночных параметров, согласованных с обозначениями, переменными и ограничениями динамической многокритериальной постановки, сформированной в главе 3. Эти данные характеризуют базовое состояние системы и используются для задания мощностей, качества, запасов, спроса, ценовых условий и технологических зависимостей подсистемы переработки в квартальном разрезе $t = 1, \dots, 4$.

Информационная база включает открытые годовые отчёты China Coal Group, статистические материалы угольной отрасли Китая, а также нормативные и справочные данные. При отсутствии прямых количественных значений используются реалистичные модельные оценки, основанные на соотношениях мощностей, типовых производственных характеристиках и согласованных параметрах функционирования соответствующих подсистем. Эти допущения являются частью постановки задачи и не изменяют общей логики моделирования, поскольку не затрагивают структуру ограничений и критериев, заданных в главе 3.

Для обеспечения терминологического и формального соответствия модели главы 3 используются следующие обозначения: A_i — производственная мощность шахты i (млн т/год), C_{i0} — удельные затраты добычи (юань/т), XH_i — средняя зольность исходного угля шахты i (%), V_j — мощность обогатительной фабрики j (млн т/год), C_{j1} — удельные затраты переработки (юань/т), H_{jl} — зольность товарной марки l на фабрике j (%), V_i^0 — начальные запасы исходного угля на шахте (тыс. т), R_{jl}^0 — начальные запасы товарных марок на фабрике (тыс. т). Рыночные входы задаются поквартально: E_{kl}^t — заявка потребителя k на марку l в период t (тыс. т/кв.), P_{kl}^t — контрактная/референсная цена (юань/т), F_{kl} — норматив по зольности (%).

Перед представлением производственно-технических параметров уточняется принятая в модели классификация товарных марок угля. Индекс l обозначает тип товарного угля: $l = 0$ — исходный (рядовой) уголь, $l = 1$ — коксующийся уголь, $l = 2$ — энергетический уголь, $l = 3$ — обогащённый или смешанный уголь. Для отдельных шахт и перерабатывающих узлов набор l может быть неполным, что отражает специализацию производственного профиля и наличие/отсутствие обогащения; в таблицах такие позиции отмечены прочерком. В дальнейшем данная классификация используется при задании параметров качества H_{jl} , заявок E_{kl}^t и ограничений по качеству F_{kl} в расчётной постановке.

Для постановки задачи существенное значение имеют производственно-технические параметры шахт и фабрик, поскольку они задают ограничения по добыче и переработке. Соответствующие данные приведены в таблице 32.

Таблица 32 — Производственно-технические параметры шахт и фабрик China Coal (составлено автором по данным годовых отчётов China Coal)

Шахта	A_i , млн т/год	C_{i0} , юаней/т	XH_i , %	V_j , млн т/год	C_{j1} , юаней/т	H_{jl} (% по категориям $l = 1-3$)
Антайбао	30,0	178	33,2	15,0	36	$l_1=13.0 ; l_2=18.5 ; l_3=10.5$
Ванцзялин	6,0	185	35,8	3,0	38	$l_1=12.5 ; l_2=19.0 ; l_3=11.0$
Яоцяо	4,0	198	32,0	2,0	39	$l_1=11.5 ; l_3=10.0$
Сюйчжуан	2,0	195	29,5	1,2	38	$l_1=12.0 ; l_3=10.2$
Налинхэ №2	15,0	176	30,0	8,0	35	$l_2=17.0 ; l_3=9.5$
Мудучайден	10,0	179	30,5	5,0	36	$l_2=18.0 ; l_3=10.0$
Наньян	3,0	182	29,8	1,5	37	$l_1=13.5 ; l_3=10.8$

Продолжение таблицы 32

Шахта	A_i , млн т/год	C_{i0} , юаней/т	XH_i , %	B_j , млн т/год	C_{j1} , юаней/т	H_{jl} (% по категориям $l = 1-3$)
Илань №3	3,0	192	34,0	—	—	(без обогащения)
Даньаньху	8,0	183	30,2	4,0	36	$l_2=16.5$; $l_3=9.8$
Вэйцзыгоу	2,0	186	30,5	1,2	—	$l_2=18.5$; $l_3=11.0$

Наряду с производственно-техническими параметрами существенное значение для задания исходных данных имеют начальные запасы угля, поскольку именно они задают начальные параметры состояния системы и обеспечивают временную поэтапную связанность режимов функционирования на горизонте планирования. Соответствующие данные приведены в таблице 33.

Таблица 33 — Показатели запасов угля на шахтах и фабриках China Coal (составлено автором по данным годовых отчётов China Coal)

Шахта	V_i^0 , тыс. т	R_{j0}^0 , тыс. т	R_{j1}^0 , тыс. т	R_{j2}^0 , тыс. т	R_{j3}^0 , уголь, тыс. т
Антайбао	65	30	20	25	22
Ванцзялин	55	25	15	18	16
Яоцяо	40	18	12	—	10
Сюйчжуан	35	16	10	—	8
Налинхэ №2	80	38	—	30	26
Мудучайден	60	28	—	24	20
Наньян	28	14	9	—	8
Илань №3	25	—	—	—	—
Даньаньху №10	45	20	—	18	15
Вэйцзыгоу	30	14	—	12	—

Таблицы 32–33 фиксируют мощности, показатели качества и начальные запасы, принимаемые в расчёте как исходные условия функционирования системы. Эти параметры используются при задании ограничений по добыче, переработке, хранению и качеству продукции, а также при расчёте временной поэтапной динамики запасов.

Отдельную группу исходных данных составляют технологические параметры подсистемы переработки. В прикладном примере связь выпусков товарных марок на фабриках с входным потоком переработки и качеством сырья задаётся регрессионной параметризацией, полученной в подразделе 3.4 и представленной в таблице 31. Указанные коэффициенты используются в модели как технологические соотношения, связывающие объём переработки, качество входного сырья и выпуск продукции в каждом периоде. Тем самым внутренняя производственно-техническая база модели включает не только мощности и запасы, но и параметризованное описание технологической динамики подсистемы переработки.

Внешние входы модели задаются через квартальные матрицы спроса, цен и требований к качеству, что обеспечивает замыкание контура «добыча → переработка → складирование → сбыт» и позволяет рассчитывать показатель логистической устойчивости и выполнения заказов

на горизонте. В модели рассматриваются пять репрезентативных категорий потребителей, отражающих типовые сегменты спроса: электроэнергетика, металлургия, углехимия, строительные материалы и торговый контур.

Таблицы 34–37 задают квартальную структуру спроса и цен и тем самым определяют внешние условия функционирования системы в каждом периоде. Эти данные используются как верхние границы поставок, как параметры выходного эффекта в составе интегрального показателя ресурсной результативности и как нормативы качества, обеспечивающие инженерную интерпретацию выполнения заявок потребителей в составе показателя.

Таблица 34 — Потребности клиентов *China Coal* ($t=1$, I квартал) (составлено автором по данным годовых отчётов *China Coal*)

k	E_{k0}^4	P_{k0}^4	F_{k0}	E_{k1}^4	P_{k1}^4	F_{k1}	E_{k2}^4	P_{k2}^4	F_{k2}	E_{k3}^4	P_{k3}^4	F_{k3}
A	6	460	30	19	690	8.5	52	525	17	8	545	17
B	4	455	30	17	675	8.5	47	520	17	6	540	17
C	0	—	—	15	680	8.5	36	515	17	7	540	17
D	9	445	30	0	—	—	18	500	17	0	—	—
E	15	440	30	0	—	—	11	505	17	5	535	17

Таблица 35 — Потребности клиентов *China Coal* ($t=2$, II квартал) (составлено автором по данным годовых отчётов *China Coal*)

k	E_{k0}^4	P_{k0}^4	F_{k0}	E_{k1}^4	P_{k1}^4	F_{k1}	E_{k2}^4	P_{k2}^4	F_{k2}	E_{k3}^4	P_{k3}^4	F_{k3}
A	0	—	—	22	670	8.5	41	510	17	9	530	17
B	7	455	30	16	660	8.5	38	505	17	5	520	17
C	0	—	—	12	650	8.5	33	500	17	6	515	17
D	10	445	30	0	—	—	20	490	17	0	—	—
E	12	440	30	0	—	—	9	495	17	4	515	17

Таблица 36 — Потребности клиентов *China Coal* ($t=3$, III квартал) (составлено автором по данным годовых отчётов *China Coal*)

k	E_{k0}^4	P_{k0}^4	F_{k0}	E_{k1}^4	P_{k1}^4	F_{k1}	E_{k2}^4	P_{k2}^4	F_{k2}	E_{k3}^4	P_{k3}^4	F_{k3}
A	3	445	30	20	660	8.5	45	495	17	10	520	17
B	5	445	30	17	655	8.5	39	490	17	7	515	17
C	0	—	—	15	640	8.5	34	485	17	5	510	17
D	8	430	30	0	—	—	18	475	17	0	—	—
E	11	430	30	0	—	—	10	480	17	3	505	17

Таблица 37 — Потребности клиентов *China Coal* ($t=4$, IV квартал) (составлено автором по данным годовых отчётов *China Coal*)

k	E_{k0}^4	P_{k0}^4	F_{k0}	E_{k1}^4	P_{k1}^4	F_{k1}	E_{k2}^4	P_{k2}^4	F_{k2}	E_{k3}^4	P_{k3}^4	F_{k3}
A	0	—	—	0	—	—	45	505	17	10	540	17
B	0	—	—	16	665	8.5	0	—	—	5	555	17
C	0	—	—	0	—	—	11	525	17	9	545	17
D	4	445	30	0	—	—	13	505	17	0	—	—
E	18	435	30	0	—	—	0	—	—	11	540	17

Представленные в таблицах 32–37 параметры образуют исходную информационную базу вычислительного эксперимента и используются при задании переменных и ограничений модели, разработанной в главе 3. Внутренние производственно-технические параметры и параметры состояния задают ограничения по добыче, переработке, качеству продукции, запасам и складским ёмкостям. Параметры, связанные с условиями спроса, используются при задании объёмов поставок, ценовых характеристик продукции и требований к её качеству. Технологическая параметризация переработки, полученная на основе регрессионных зависимостей, включается в модель как элемент системы технологических ограничений и обеспечивает связь между качественными характеристиками входного сырья и достижимой структурой выпуска товарной продукции.

Таким образом, в настоящем разделе фиксируется не только состав исходных данных, но и их отображение в параметры системы исходных данных. Все указанные данные образуют вход вычислительной процедуры, реализуемой далее в программной среде MATLAB с использованием алгоритма NSGA-II. На их основе задаются допустимая область, вектор критериев (U , границы изменения переменных, параметры технологических связей и условия проверки допустимости режимов функционирования производственно-логистической системы).

Тем самым подраздел 4.2 формирует полный набор исходных параметров, необходимых для решения прикладной задачи: внутренние технологические ограничения и параметры состояния, внешние рыночные условия, а также параметры агрегирования критериев функционирования системы. Представленная информационная база используется при дальнейшем применении вычислительного алгоритма NSGA-II для оптимизации процессов функционирования производственно-логистической системы угольной компании China Coal.

Таким образом, представленные в настоящем разделе исходные данные и параметры образуют информационную основу вычислительного эксперимента. Их использование осуществляется в рамках динамической многокритериальной постановки, сформированной в подразделе 3.4.3, где векторная целевая функция задаётся в виде (40):

$$\max(U(x), \mu(x)), x \in \Omega. \quad (40)$$

Полные выражения критериев U и μ а также система ограничений модели в настоящей главе не дублируются и принимаются в соответствии с подразделом 3.4.3 как формализованная основа дальнейшей реализации и построения множества Парето-оптимальных решений.

4.3 Применение вычислительного алгоритма NSGA-II в программной среде MATLAB для оптимизации процессов функционирования системы

В настоящем подразделе рассматривается вычислительная процедура получения множества Парето-оптимальных режимов функционирования производственно-логистической

системы China Coal на основе динамической многокритериальной модели, сформированной в главе 3. Цель данной процедуры состоит не в поиске единственного «лучшего» решения, а в формировании репрезентативного множества Парето-оптимальных решений по двум показателям векторной цели — интегральному показателю ресурсной результативности U и показателю логистической устойчивости и выполнения заказов — при соблюдении системы ограничений. В качестве вычислительного механизма используется алгоритм NSGA-II, реализованный в среде MATLAB с помощью функции gamultiobj пакета Global Optimization Toolbox.

Каждый режим функционирования системы кодируется в виде вектора управляемых переменных. Формально соответствующее представление задаётся выражением (41):

$$x = \{X_i^t, X_{ij}^t, Y_j^t, L_{jl}^t, V_i^t, R_{jl}^t, Z_{jkl}^t, Z_{ik0}^t, Q_{kl}^t\}_{t=1, \dots, T}, \quad (41)$$

где x — вектор управляемых переменных, описывающий режим функционирования системы;

t — временной индекс, соответствующий принятому шагу планирования;

T — число периодов на горизонте планирования;

$X_i^t, X_{ij}^t, Y_j^t, L_{jl}^t, V_i^t, R_{jl}^t, Z_{jkl}^t, Z_{ik0}^t, Q_{kl}^t$ — переменные модели, характеризующие объёмы добычи, переработки, распределения, запасов и поставок в соответствующий период.

Межпериодная динамика обеспечивается балансами запасов на шахтах и перерабатывающих узлах. Высокая размерность вектора x обусловлена сетевой структурой модели, задаваемой множествами I, J, K, L, и дискретной динамикой на горизонте $= 1, \dots, T$, что требует использования методов, устойчивых к высокой размерности и сложной геометрии допустимой области.

По результатам главы 3 допустимое множество режимов задаётся по формуле (30). Поскольку задача носит прикладной характер, в вычислительной процедуре применяется приоритет реализуемости: любые решения, нарушающие ограничения, рассматриваются как недопустимые и не должны попадать в итоговое множество Парето. Для этого вводится скалярная мера нарушения ограничений, определяемая по формуле (42):

$$CV(x) = \sum_r \max\{0, g_r(x)\} + \sum_s |h_s(x)|, \quad (42)$$

где $CV(x)$ — скалярная мера нарушения ограничений для решения x ;

$g_r(x)$ — значение r -го ограничения типа неравенства;

$h_s(x)$ — значение s -го ограничения типа равенства;

$\sum_r \max\{0, g_r(x)\}$ — суммарное нарушение ограничений-неравенств;

$\sum_s |h_s(x)|$ — суммарное нарушение ограничений-равенств.

При сравнении рассматриваемых решений используется следующее правило. Сначала минимизируется значение $CV(x)$, то есть предпочтение получают решения с меньшей степенью

нарушения ограничений. При $CV(x)=0$ применяется стандартное ранжирование NSGA-II в пространстве (U, μ) и показатель разреженности (crowding distance) для поддержания разнообразия.

Программная реализация модели выполнена в среде MATLAB с использованием функции `gamultiobj`, реализующей алгоритм NSGA-II. При этом программная настройка процедуры относится не к разработке нового алгоритма, а к адаптации вычислительного механизма к структуре рассматриваемой задачи. В рамках реализации задаются структура переменных решения, их допустимые границы в соответствии с ограничениями главы 3 и параметрической базой главы 4, а также процедура оценки допустимости решений и вычисления значений показателей U и μ . Для всех серий расчётов параметры запуска задаются единообразно, а воспроизводимость результатов обеспечивается фиксированием генератора псевдослучайных чисел.

Завершение оптимизационной процедуры определяется достижением заданного числа поколений и стабилизацией фронта Парето по принятому показателю сходимости. Это позволяет оценить достаточность вычислительных ресурсов для формирования представительного множества Парето-оптимальных решений. В итоговом представлении результатов используются фронт Парето в пространстве (U, μ) , динамика показателя сходимости по поколениям и отчёт о выполнении ограничений. После завершения эволюционной процедуры выполняется обработка полученного множества решений, в рамках которой исключаются повторяющиеся или практически совпадающие альтернативы. Далее по правилу минимального нормированного расстояния до идеальной точки выделяется репрезентативный режим. Указанная процедура применяется после построения фронта Парето и не означает предварительного сведения задачи к одному критерию. Тем самым NSGA-II в настоящей работе рассматривается как вычислительный механизм построения множества реализуемых альтернативных режимов функционирования системы, а последующая обработка результатов обеспечивает переход к их содержательной интерпретации.

4.4 Обоснование и выбор сбалансированного режима функционирования производственно-логистической системы угольной компании China Coal

В настоящем подразделе представлены результаты численного решения динамической многокритериальной модели производственно-логистической системы China Coal, сформированной в главе 3 и подготовленной к вычислительному эксперименту в подразделах 4.1–4.3. Вычислительная реализация выполнена в среде MATLAB с применением эволюционного алгоритма NSGA-II, обеспечивающего построение множества Парето-оптимальных решений без предварительного задания весов критериев [6].

Исходными данными для оптимизационных расчётов служили параметры, представленные в подразделе 4.2 (производственные мощности, удельные ресурсные нагрузки, качественные характеристики, ограничения по запасам и ёмкостям, а также рыночные входы), а также технологическая параметризация подсистемы переработки, основанная на регрессионных зависимостях по фабрикам (п. 3.4; таблица 31). Расчёты производились на горизонте планирования $t = 1 \dots 4$ (кварталы), что позволяет проследить динамику потоков и параметров состояния (запасов) и оценить согласованность режимов функционирования в условиях временной поэтапной связанности и изменения внешних заявок.

Результаты оптимизационного поиска представлены в виде Парето-фронта в пространстве двух показателей: интегрального показателя ресурсной результативности U и показателя логистической устойчивости и выполнения заказов μ . Каждая точка фронта соответствует допустимому производственно-логистическому режиму (плану), согласованному по ограничениям мощностей, запасов, пропускной способности и требований к качеству. Анализ структуры фронта используется для выделения одной опорной стратегии (режима), удобной для интерпретации и последующих практических рекомендаций.

По итогам выполнения алгоритма NSGA-II получено множество Парето-оптимальных решений P^* . В рассматриваемом вычислительном эксперименте в его состав вошли 12 решений, образующих первый Парето-фронт итоговой популяции после выполнения критериев останковки, связанных со стабилизацией фронта по показателям сходимости. Полученная дискретная совокупность точек отражает границу компромиссов между U и μ и служит основой для последующего анализа допустимых режимов функционирования системы (рисунок 13).

Интерпретация фронта показывает закономерный конфликт критериев: повышение U при фиксированной структуре ограничений, как правило, требует перераспределения потоков и режимов, что может приводить к снижению по части направлений поставок; напротив, рост μ достигается ценой увеличения ресурсной нагрузки на сеть или более консервативного режима использования мощностей. При этом важно, что «устойчивость» в составе показателя μ отражается через агрегирование по периодам: высокие значения μ достижимы только при стабильно высоком выполнении заявок и качественных требований на всём горизонте, а не за счёт локального улучшения в одном периоде.

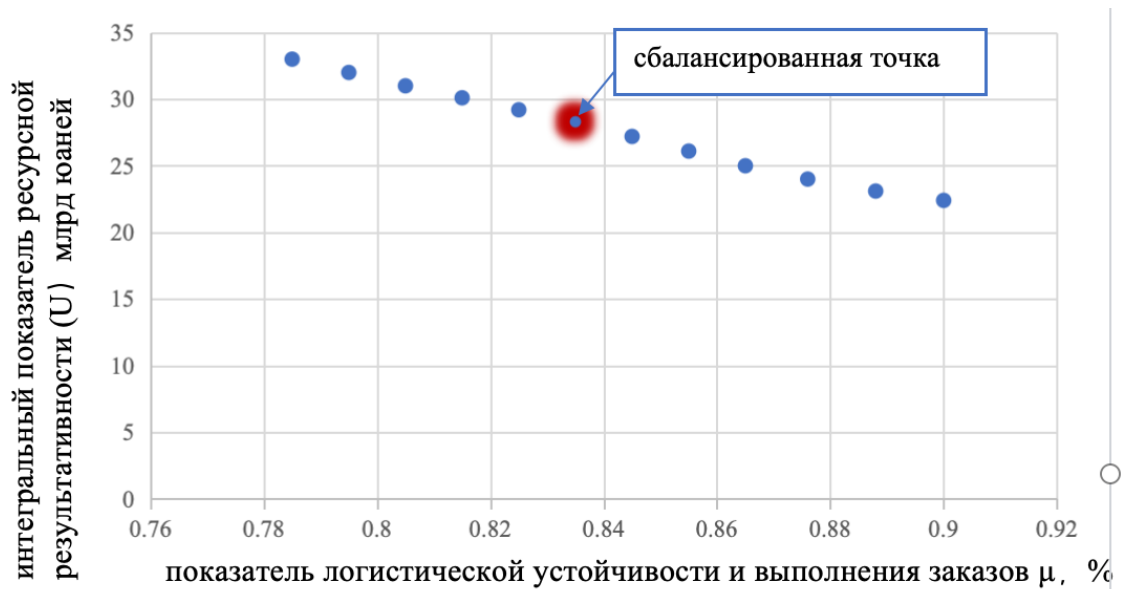


Рисунок 13 — Парето-фронт оптимизационной задачи China Coal Energy (NSGA-II)
(составлено автором)

С практической точки зрения область фронта вблизи соответствует режимам, при которых выполнение объёмно-качественных требований потребителей достигается без «провалов» по отдельным кварталам и направлениям, что содержательно согласуется с выводами п. 2.2 о роли вариативности качества и спроса: режим остаётся работоспособным при неизбежных колебаниях параметров, поскольку ограничения по качеству и балансам выполняются в динамике, а не точно.

Характерные зоны фронта интерпретируются следующим образом: при близком к максимальным значениям достигается наиболее высокий уровень выполнения объёмно-качественных требований, однако значение U оказывается ниже, чем у режимов с более интенсивной ресурсной загрузкой; при U , близком к максимуму, сеть функционирует в режиме высокой ресурсной отдачи, однако значение μ снижается, что отражает ухудшение выполнения заявок по части направлений; промежуточная область фронта задаёт поле управленческих альтернатив для выбора опорного режима.

Для выделения одного содержательно интерпретируемого режима из множества P^* используется критерий минимального нормированного расстояния до идеальной точки. Данная процедура применяется после построения множества Парето-оптимальных решений и служит для интерпретации результатов и выбора опорного режима, не означая предварительного сведения задачи к одному критерию.

Пусть $x_i \in P^*$ — i -е Парето-оптимальное решение, $U_i = U(x_i)$, $\mu_i = \mu(x_i)$. Для обеспечения сопоставимости критериев на множестве P^* выполняется их нормирование. Соответствующие преобразования задаются (43):

$$\bar{U}_i = \frac{U_i - U_{min}}{U_{max} - U_{min}}, \bar{\mu}_i = \frac{\mu_i - \mu_{min}}{\mu_{max} - \mu_{min}}, \quad (43)$$

где U_i — значение интегрального показателя ресурсной результативности для i -го решения;

μ_i — значение показателя логистической устойчивости и выполнения заказов для i -го решения;

U_{min}, U_{max} — минимальное и максимальное значения критерия U на множестве Парето;

μ_{min}, μ_{max} — минимальное и максимальное значения критерия μ на множестве Парето.

После нормирования критериев рассчитывается евклидово расстояние от каждого решения до идеальной точки (1,1). Указанное расстояние определяется формулой (44):

$$d_i = \sqrt{(1 - \bar{U}_i)^2 + (1 - \bar{\mu}_i)^2}. \quad (44)$$

В качестве опорного выбирается решение, для которого это расстояние минимально. Соответствующее условие записывается (45):

$$x^* = \arg \min_{x_i \in P^*} d_i. \quad (45)$$

В результате для рассматриваемого вычислительного эксперимента опорный режим соответствует области значений $U = 28,3$ млрд юаней и $\mu = 0,835$, то есть обеспечивает согласование ресурсной результативности производственно-логистической системы и устойчивости выполнения объёмно-качественных требований потребителей на всём горизонте планирования. В последующих подразделах главы 4 данный режим используется как базовый для детального анализа динамики потоков и формирования прикладных рекомендаций по согласованию добычи, переработки, транспортировки и отгрузки.

Таким образом, применение алгоритма NSGA-II к многоцелевой динамической модели позволило получить номинируемое множество P^* , отражающее структуру компромиссов между U и μ . Для перехода от «поля альтернатив» к одной опорной стратегии использован метод минимального нормированного расстояния до идеальной точки, обеспечивающий прозрачный и воспроизводимый выбор режима без предварительного навязывания приоритетов между критериями. Полученный опорный режим служит исходной точкой для дальнейшего анализа его инженерной реализуемости и практической интерпретации.

Построенное множество Парето-оптимальных режимов P^* позволяет перейти от анализа структуры компромиссов к формированию согласованного производственно-логистического плана на горизонте планирования. Для целей дальнейшей детализации выбран Парето-оптимальный режим, соответствующий минимальному нормированному расстоянию до идеальной точки. Указанная процедура используется на этапе интерпретации результатов и не означает предварительного сведения задачи к одному критерию при решении исходной векторной задачи.

Ниже представлена декомпозиция выбранного режима по ключевым подсистемам производственно-логистической системы: добыче (шахты), переработке (обогащительные фабрики) и отгрузке (потребительский контур). Представленные расчётные массивы соответствуют системе переменных и ограничений модели, сформированной в главе 3, и получены по результатам вычислительной реализации, выполненной в настоящей главе. Поквартальные объёмы добычи, соответствующие выбранному режиму, представлены в таблице 38 и отражают согласование объёмов добычи с ограничениями по производственным мощностям, балансовыми соотношениями и динамикой запасов t на шахтах. Изменение по периодам характеризует адаптацию режима к поквартальной структуре внешнего спроса (см. таблицы 34–37), а также к перераспределению потоков в подсистемах переработки и отгрузки.

Таблица 38 — Объёмы добычи угля X_i^t по шахтам *China Coal* (тыс. т в квартал) (по данным автора)

Шахта i	Q1	Q2	Q3	Q4
Антайбао	1400	13800	1350	1440
Ванцзялин	330	3335	300	310
Яоцяо	120	1150	110	110
Сюйчжуан	120	1035	100	110
Налинхэ № 2	2400	23000	2200	2310
Мудучайден	850	8050	800	880
Наньян	100	920	90	100
Илань № 3	100	1035	100	120
Даньаньху № 10	450	4370	420	460
Вэйцзыгоу	120	1150	110	120
Итого	59900 тыс. т	57854 тыс. т	55800 тыс. т	59600 тыс. т

Для оценки согласованности переработки с внутренними потоками рассчитаны поквартальные значения объёма входного потока переработки и выпуска товарных марок продукции. Выпуск марок определяется технологической параметризацией переработки, заданной регрессионными зависимостями (глава 3, п. 3.4; таблица 31), то есть рассматривается как функция объёма переработки и качества входного сырья. Тем самым обеспечивается формализованная связка «входной поток \rightarrow технологический выход \rightarrow запас/отгрузка» в условиях дискретной динамики.

Сводные результаты представлены в таблицах 39–42 (по каждому периоду). Они позволяют сопоставить фактическую загрузку обогащительных фабрик с ограничениями по мощности, а также выявить изменения продуктового профиля по периодам при изменении качества входного потока и структуры отгрузок.

Таблица 39 — Переработка и выпуск по фабрикам ($t=1$, I квартал; тыс. т/квартал) (по данным автора)

j	Фабрика	Y_j^1	L_{j1}^1	L_{j2}^1	L_{j3}^1
1	Антайбао (I)	820	410	240	150

Продолжение таблицы 39

j	Фабрика	Y_j^1	L_{j1}^1	L_{j2}^1	L_{j3}^1
2	Антайбао (II)	800	390	235	145
3	Ванцзялин (III)	170	85	55	20
4	Яоцяо (IV)	110	58	0	45
5	Сюйчжуан (V)	70	33	0	28
6	Налинхэ (VI)	900	0	560	310
7	Налинхэ (VII)	880	0	545	300
8	Мудучайден (VIII)	520	0	330	170
9	Наньлян (IX)	150	75	0	55
10	Даньаньху (X)	400	0	250	130
11	Даньаньху (XI)	360	0	230	110
12	Вэйцзыгоу (XII)	170	0	105	57
Итого	—	5116	1005	2437	1441

Таблица 40 — Переработка и выпуск по фабрикам ($t=2$, II квартал; тыс. т/квартал) (по данным автора)

j	Фабрика	Y_j^1	L_{j1}^1	L_{j2}^1	L_{j3}^1
1	Антайбао (I)	790	395	230	140
2	Антайбао (II)	780	385	225	140
3	Ванцзялин (III)	165	82	53	20
4	Яоцяо (IV)	105	55	0	43
5	Сюйчжуан (V)	68	32	0	27
6	Налинхэ (VI)	880	0	545	300
7	Налинхэ (VII)	860	0	530	295
8	Мудучайден (VIII)	500	0	320	165
9	Наньлян (IX)	145	72	0	53
10	Даньаньху (X)	390	0	245	125
11	Даньаньху (XI)	350	0	222	108
12	Вэйцзыгоу (XII)	175	0	108	58
Итого	—	5208	1021	2478	1474

Таблица 41 — Переработка и выпуск по фабрикам ($t=3$, III квартал; тыс. т/квартал) (по данным автора)

j	Фабрика	Y_j^1	L_{j1}^1	L_{j2}^1	L_{j3}^1
1	Антайбао (I)	780	390	225	138
2	Антайбао (II)	770	382	222	138
3	Ванцзялин (III)	160	80	52	19
4	Яоцяо (IV)	100	52	0	41
5	Сюйчжуан (V)	66	31	0	26
6	Налинхэ (VI)	870	0	540	295
7	Налинхэ (VII)	850	0	525	290
8	Мудучайден (VIII)	490	0	315	160
9	Наньлян (IX)	140	70	0	50
10	Даньаньху (X)	380	0	238	122
11	Даньаньху (XI)	340	0	215	105
12	Вэйцзыгоу (XII)	170	0	105	57
Итого	—	5116	1005	2437	1441

Таблица 42 — Переработка и выпуск по фабрикам ($t=4$, IV квартал; тыс. т/квартал) (по данным автора)

j	Фабрика	Y_j^1	L_{j1}^1	L_{j2}^1	L_{j3}^1
1	Антайбао (I)	840	420	245	155
2	Антайбао (II)	830	410	240	150
3	Ванцзялин (III)	175	88	56	21
4	Яоцяо (IV)	115	60	0	47
5	Сюйчжуан (V)	75	35	0	31
6	Налинхэ (VI)	920	0	575	320
7	Налинхэ (VII)	900	0	565	310
8	Мудучайден (VIII)	520	0	335	175
9	Наньян (IX)	155	78	0	57
10	Даньяньху (X)	410	0	265	135
11	Даньяньху (XI)	380	0	245	120
12	Вэйцзыгоу (XII)	185	0	115	62
Итого	—	5505	1091	2641	1583

Поквартальные объёмы поставок по группам потребителей и видам угольной продукции приведены в таблице 43. Данные отражают выполнение условий по объёму поставок и обеспечивают основу для интерпретации показателя μ как агрегированной характеристики выполнения заявок на горизонте планирования. Соответствие качественных параметров поставок установленным требованиям обеспечивается заданными в модели условиями идентификации фактических характеристик потоков и ограничениями по качеству.

Таблица 43 — Поквартальные объёмы поставок угольной продукции клиентам, тыс. т (по данным автора)

Квартал t	Клиент	Q_{k0} исх.	Q_{k1} кокс.	Q_{k2} энерг.	Q_{k3} смеш.	Итого
Q1	A	0	0	130	25	155
	B	0	35	0	12	47
	C	0	0	33	17	50
	D	10	0	45	0	55
	E	45	0	0	22	67
Итого Q1		55	35	208	76	374
Q2	A	0	0	95	18	113
	B	0	25	0	9	34
	C	0	0	25	15	40
	D	8	0	38	0	46
	E	38	0	0	18	56
Итого Q2		46	25	158	60	289
Q3	A	0	0	110	20	130
	B	0	28	0	11	39
	C	0	0	28	17	45
	D	11	0	42	0	53
	E	40	0	0	21	61

Продолжение таблицы 43

Квартал t	Клиент	Q_{k0} исх.	Q_{kl} кокс.	Q_{k2} энерг.	Q_{k3} смеш.	Итого
Q4 (осень)	А	0	0	120	25	145
	В	0	32	0	14	46
	С	0	0	30	20	50
	Д	12	0	50	0	62
	Е	50	0	0	25	75
Итого Q4		62	32	200	84	378
Всего		214	120	746	289	1369

4.5 Интерпретация результатов оптимизации и решения задачи в производственно-логистической системе

Полученные в результате многокритериальной оптимизации значения целевых показателей U и μ требуют содержательной интерпретации, поскольку сами по себе интегральные критерии не позволяют непосредственно судить о том, за счёт каких именно изменений в производственно-логистической системе достигается улучшение результата. В этой связи, оба показателя рассматриваются не только как целевые функции модели, но и как агрегированное выражение конкретных физических, технологических и логистических характеристик функционирования системы. Такой подход позволяет перейти от анализа интегральных критериев к интерпретации результатов через добычу, переработку, использование мощностей, запасы, а также выполнение объёмно-качественных требований потребителей.

Первый целевой показатель в модели имеет вид (46):

$$MAXU = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L Q_{kl}^t P_{kl} - \sum_{i=1}^I X_i^t C_{i0} - \sum_{j=1}^J Y_j^t C_{j1} - \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I X_{ij}^t S_{ij} - \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L C_{l2} \frac{R_{jl}^t + R_{jl}^{t-1}}{2} - \sum_{i=1}^I C_{02} \frac{V_i^t + V_i^{t-1}}{2} \right] \quad (46)$$

Структура данного критерия показывает, что он объединяет в себе как результирующую, так и затратную составляющие. Вместе с тем в прикладной интерпретации его смысл не должен сводиться только к стоимостной характеристике. Показатель U отражает итог согласованного функционирования производственно-логистической системы, в котором экономический эффект формируется на основе изменений в объёмах добычи, переработки, внутренних перемещений, уровнях запасов и конечных поставках. Поэтому в дальнейшем данный критерий рассматривается как интегральный показатель ресурсной результативности, а его интерпретация строится через те параметры, которые непосредственно описывают режим работы системы.

Прежде всего, изменение U связано с объёмами добычи угля по шахтам, поскольку именно добыча задаёт исходную материальную основу для последующих стадий движения потока. Соответствующие значения приведены в таблице 44.

Таблица 44 — Объёмы добычи угля по шахтам China Coal: до и после оптимизации (по данным автора)

Шахта	До оптимизации, млн т/год	После оптимизации, млн т/год
Антайбао	21,60	22,20
Ванцзялин	4,80	5,00
Яоцяо	3,20	3,28
Сюйчжуан	1,60	1,64
Налинхэ №2	9,80	9,92
Мудучайден	6,40	6,48
Наньян	2,08	2,16
Илань №3	1,72	1,76
Даньяньху №10	3,40	3,48
Вэйцзыгоу	1,40	1,44
Итого	55,99	57,36

Как видно из таблицы 44, после оптимизации суммарный объём добычи возрастает с 55,99 до 57,36 млн т/год. Это означает, что улучшение интегрального результата связано не с формальным перераспределением стоимостных параметров, а с увеличением физического выпуска в системе. При этом изменение не носит локального характера и не связано с концентрацией прироста в одном узле, а распределяется между несколькими шахтами, что указывает на более согласованный режим использования добывающего звена. Такое изменение имеет значение и для последующих стадий функционирования системы, поскольку увеличение добычи расширяет ресурсную базу переработки. Следовательно, интерпретация показателя U должна учитывать не только динамику добычи, но и последующее технологическое преобразование потока.

Непосредственным продолжением добывающего процесса выступает переработка, которая в исследуемой системе задаёт технологическое преобразование исходного потока и формирование товарных марок угля. По этой причине показатель U должен интерпретироваться и через объёмы переработки. Соответствующие значения приведены в таблице 45.

Таблица 45 — Объёмы переработки по шахтам (фабрикам): до и после оптимизации (по данным автора)

Фабрика	До оптимизации, млн т/год	После оптимизации, млн т/год
Антайбао	15,44	17,41
Ванцзялин	3,06	3,67
Яоцяо	2,05	1,43
Сюйчжуан	1,07	1,27
Налинхэ №2	6,80	8,06
Мудучайден	5,23	5,03
Наньян	1,56	1,39
Илань №3	1,63	1,67
Даньяньху №10	2,78	2,91
Вэйцзыгоу	1,22	1,27
Итого	40,84	44,11

Из таблицы 45 видно, что после оптимизации суммарный объём переработки возрастает с 40,84 до 44,11 млн т/год. Следовательно, улучшение результата связано не только с увеличением добычи, но и с более полной и более согласованной загрузкой перерабатывающих мощностей. В отдельных узлах наблюдаются разнонаправленные изменения, однако на уровне системы в целом фиксируется рост переработки, что подтверждает усиление технологической согласованности между добывающим и перерабатывающим звеньями.

Существенную роль в структуре показателя U играют запасы, поскольку в целевой функции учитываются средние остатки как рядового угля, так и товарной продукции. Это означает, что при прочих равных более высокий уровень запасов повышает связанную с ними ресурсную нагрузку. В этом контексте уменьшение запасов представляет собой не только логистическое, но и содержательное ресурсное улучшение режима функционирования системы. Соответствующие данные приведены в таблице 46.

Таблица 46 — Запасы угля по шахтам: до и после оптимизации, единица измерения: тыс. т (по данным автора)

Шахта	Запасы угля до оптимизации	Запасы угля после оптимизации
Антайбао	162	65
Ванцзялин	129	55
Яоцяо	80	40
Сюйчжуан	69	35
Налинхэ №2	174	80
Мудучайден	132	60
Наньян	59	28
Илань №3	25	25
Даньяньху №10	98	45
Вэйцзыгоу	56	30
Итого	984	463
Итого	984	463

Особое значение в интерпретации показателя U имеет степень использования производственных мощностей. В данном случае речь идёт не только о формальной проверке допустимости решения, но и о содержательной характеристике того, каким образом интегральный результат достигается на уровне производственной конфигурации системы. Иными словами, увеличение ресурсной результативности должно быть связано не с абстрактным изменением стоимостных параметров, а с более полным и более рациональным использованием имеющегося производственного потенциала [27, 55, 56]. Поэтому в рамках интерпретации показателя U дополнительно рассматривается коэффициент использования мощности, позволяющий оценить, в какой мере полученное решение может быть реализовано как производственный режим.

Для каждой шахты рассчитан коэффициент использования мощности по формуле (47):

$$K_i = \frac{X_i}{A_i}, \quad (47)$$

где K_i — коэффициент использования мощности i -й шахты;

X_i — объём добычи по оптимальному решению;

A_i — проектная мощность шахты.

Соответствующие значения приведены в таблице 47.

Таблица 47 — Коэффициент использования мощностей по шахтам: до и после оптимизации, Единица измерения: доли ед. (по данным автора)

Фабрика	До оптимизации	После оптимизации
Антайбао	0,72	0,74
Ванцзялин	0,80	0,83
Яоцяо	0,80	0,82
Сюйчжуан	0,80	0,82
Налинхэ №2	0,65	0,66
Мудучайден	0,64	0,65
Наньлян	0,69	0,72
Илань №3	0,57	0,59
Даньаньху №10	0,43	0,44
Вэйцзыгоу	0,70	0,72
Среднее значение	0,67	0,69

Рост среднего коэффициента использования мощностей с 0,67 до 0,69 показывает, что после оптимизации система работает с более полной загрузкой имеющегося производственного потенциала. Это означает, что рост показателя U связан не только с увеличением физических объёмов, но и с более рациональным использованием существующих мощностей. В таком контексте интегральный экономический смысл показателя U действительно выступает как производная от изменения объёмов добычи, переработки, запасов и нагрузки на мощности.

Таким образом, показатель U в прикладной интерпретации формируется как агрегированный результат нескольких взаимосвязанных изменений: увеличения объёма добычи, роста переработки, более полного использования производственных мощностей и сокращения запасов. Эти изменения составляют первый, базовый уровень интерпретации. Лишь после этого показатель U может быть рассмотрен в стоимостном выражении как интегральный результат выбранного режима.

Второй целевой критерий в модели имеет вид (48):

$$\max \mu = \sum_{t=1}^T \sum_k \theta_k \left(\gamma_{k1} \sum_{l=0}^L \rho_{kl} \frac{Q_{kl}^t}{E_{kl}^t} + \gamma_{k2} \sum_{l=0}^L \rho_{kl} \left(1 - \frac{AH_{kl}^t - F_{kl}}{F_{kl}} \right) \right). \quad (48)$$

Структура этого критерия показывает, что он характеризует не абстрактную удовлетворённость потребителей, а степень выполнения их требований по двум направлениям — по объёму и по качеству поставок. Первая составляющая связана с сопоставлением

фактических поставок Q_{kl}^t и требуемых объёмов E_{kl}^t , то есть отражает полноту выполнения заявок по объёму. Вторая составляющая сопоставляет фактические качественные характеристики поставок AN_{kl}^t с нормативными значениями F_{kl} , что позволяет учитывать качество исполнения заказа. Веса $\theta_k, \rho_{kl}, \gamma_{k1}$ и γ_{k2} задают относительную значимость потребителей, товарных марок и двух основных компонентов критерия. В результате показатель μ приобретает содержательный смысл как интегральный показатель логистической устойчивости и выполнения объёмно-качественных требований потребителей.

Как и в случае с показателем U , интерпретация μ требует перехода от интегрального критерия к его прикладным составляющим. Прежде всего, это относится к количественному компоненту, который позволяет оценить, насколько полно система обеспечивает требуемые объёмы поставок по каждому потребителю. Соответствующие результаты представлены в таблице 48.

Таблица 48 — Сопоставление объёмов требований потребителей и поставок: до и после оптимизации (по данным автора)

Потребитель	До оптимизации, %	После оптимизации, %	Изменение, п.п.
А	82,0 %	96,1 %	14,2 %
В	86,1 %	95,1 %	9,0 %
С	82,7 %	90,8 %	8,1 %
Д	76,4 %	81,9 %	5,6 %
Е	73,0 %	82,6 %	9,7 %
Итого за год	80,4 %	90,8 %	10,4 %

Из таблицы 48 следует, что после оптимизации уровень выполнения требований потребителей по объёму поставок возрастает по всем рассматриваемым группам. Наиболее заметное улучшение наблюдается по потребителю А, однако положительная динамика прослеживается по всем клиентским категориям. В среднем по совокупности потребителей соответствующий показатель увеличивается с 80,4 до 90,8 %, то есть на 10,4 п.п. Следовательно, количественный компонент показателя возрастает за счёт более полного удовлетворения заявок по объёму.

Наряду с этим, в составе показателя учитывается и качественный компонент, отражающий соответствие поставляемой продукции нормативам потребителей. Соответствующие результаты приведены в таблице 48.

Как видно из таблицы 49, после оптимизации возрастает и степень соответствия качества поставляемой продукции требованиям потребителей по качеству. Положительная динамика наблюдается по всем группам потребителей, а интегральная оценка повышается с 75,7 до 82,7 %, то есть на 7,0 п.п. Это означает, что оптимизированный режим обеспечивает улучшение не только количественного, но и качественного выполнения поставок. Следовательно, прирост

критерия μ связан не с механическим увеличением объёмов отгрузки, а с более согласованным формированием поставляемого потока как по объёму, так и по качественным характеристикам.

Таблица 49 — Сопоставление качества поставляемой продукции требованиям потребителей: до и после оптимизации (по данным автора)

Потребитель	До оптимизации, %	После оптимизации, %	Изменение, п.п.
А	74,4 %	81,0 %	6,6 %
В	78,9 %	86,3 %	7,4 %
С	77,8 %	84,6 %	6,8 %
Д	70,8 %	77,9 %	7,1 %
Е	76,7 %	83,8 %	7,1 %
Итого за год	75,7 %	82,7 %	7,0 %

Сопоставление таблиц 48 и 49 показывает, что второй целевой показатель модели формируется как результат одновременного улучшения количественного и качественного аспектов обслуживания потребителей. В этом смысле критерий отражает устойчивость логистического режима не только по интенсивности поставок, но и по их содержательному соответствию требованиям потребителей. Поэтому данный критерий корректнее рассматривать как интегральный показатель логистической устойчивости и выполнения объёмно-качественных требований, а не как субъективную характеристику удовлетворённости.

В совокупности результаты интерпретации показателей U и μ показывают, что оба интегральных показателя имеют ясное прикладное содержание. Показатель U формируется за счёт изменений в добыче, переработке, загрузке мощностей и запасах. Показатель μ — за счёт изменений в выполнении заказов по объёму и в соответствии качества поставок требованиям потребителей. Следовательно, итоговые значения критериев представляют собой агрегированную форму выражения более фундаментальных физических, производственно-технологических и логистических параметров системы. Именно в этом смысле экономический и логистический эффекты выступают производными от реальных изменений в конфигурации и режиме функционирования производственно-логистической системы угольной компании.

Для определения элементов производственно-логистической системы, за счёт которых формируется достигнутый интегральный эффект, далее рассматриваются относительные изменения базовых показателей до и после оптимизации.

Содержательная интерпретация показателей U и μ позволяет перейти к сопоставлению производственно-логистических параметров, формирующих их структуру. В качестве базы сравнения используются показатели, непосредственно связанные с указанными показателями: для U — объёмы добычи и переработки, уровень запасов и коэффициенты использования мощностей; для μ — уровень выполнения требований потребителей по объёму поставок и степень соответствия качества поставляемой продукции установленным требованиям. Такое сопоставление позволяет оценить масштаб изменений основных составляющих

производственно-логистической системы при переходе от исходного режима к оптимизированному.

Для показателей, увеличение которых интерпретируется как улучшение результата, относительное изменение рассчитывается по формуле (49):

$$\Delta Z = \frac{Z_{\text{после}} - Z_{\text{до}}}{Z_{\text{до}}} \cdot 100\%. \quad (49)$$

Для показателей, снижение которых рассматривается как положительный результат, в частности для запасов, величина улучшения определяется по формуле (50):

$$\Delta Z = \frac{Z_{\text{до}} - Z_{\text{после}}}{Z_{\text{до}}} \cdot 100\%. \quad (50)$$

По данным таблицы 50 наибольшая амплитуда изменения наблюдается по показателю запасов. Их снижение на 52,95 % свидетельствует о существенном сокращении объёма ресурсов, удерживаемых в системе в форме запасов. Сокращение объёма запасов выступает одним из наиболее заметных результатов оптимизации. В прикладном отношении такой результат означает более согласованное взаимодействие подсистем добычи, переработки и отгрузки, при котором снижается потребность в накоплении промежуточных остатков.

Таблица 50 — Относительные изменения ключевых производственно-логистических показателей до и после оптимизации (по данным автора)

Показатель	До оптимизации	После оптимизации	Относительное изменение, %	Интерпретация
Объём добычи, млн т/год	55,99	57,36	2,45	рост физического выпуска
Объём переработки, млн т/год	40,84	44,11	8,01	усиление перерабатывающей составляющей
Запасы угля, тыс. т	984	463	52,95	снижение запасоёмкости системы
Средний коэффициент использования мощностей	0,67	0,69	2,99	более полная загрузка мощностей
Выполнение требований по объёму поставок, %	80,4	90,8	12,94	рост уровня выполнения заказов
Соответствие качества требованиям потребителей, %	75,7	82,7	9,25	улучшение качественного исполнения поставок

Существенные изменения зафиксированы и по показателям, характеризующим выполнение требований потребителей. Уровень выполнения заказов по объёму увеличивается на 12,94 %, а показатель соответствия качества требованиям потребителей — на 9,25 %.

Следовательно, улучшение показателя μ связано одновременно с более полным покрытием спроса и с повышением качества исполнения поставок.

Объём переработки увеличивается на 8,01 %, тогда как прирост объёма добычи составляет 2,45 %. Такое соотношение показывает, что интегральный эффект оптимизации обусловлен не только расширением добывающего звена, но и более полным доведением потока до стадии переработки. Иначе говоря, заметная часть прироста показателя U формируется за счёт согласования добычи и перерабатывающего контура системы.

Изменение среднего коэффициента использования мощностей составляет 2,99 %. По сравнению с другими показателями данная величина выглядит более умеренной, однако именно это обстоятельство представляет интерес с точки зрения интерпретации результата. Рост интегральных критериев достигается без резкого увеличения нагрузки на производственный потенциал. Это позволяет рассматривать полученный режим как более рациональную, а не более напряжённую конфигурацию использования мощностей.

Сопоставление относительных изменений показывает, что отклик различных элементов производственно-логистической системы на оптимизационное воздействие является неодинаковым. Наиболее заметная реакция наблюдается в области запасов, выполнения требований потребителей по объёму поставок и качества исполнения поставок. Более умеренные, но устойчивые изменения характерны для добычи, переработки и использования мощностей. Тем самым интегральный эффект оптимизации формируется на основе согласованных изменений в нескольких взаимосвязанных подсистемах, а не за счёт одного доминирующего фактора.

В содержательном отношении проведённый анализ уточняет механизм формирования целевых показателей U и μ . Для показателя U наибольшее значение имеют сокращение запасов и рост переработки при умеренном увеличении добычи и использовании мощностей. Для показателя μ определяющими оказываются повышение уровня выполнения заказов по объёму и улучшение качественного соответствия поставляемой продукции требованиям потребителей. Таким образом, сопоставление относительных изменений позволяет связать интегральные результаты оптимизации с конкретными изменениями в режиме функционирования производственно-логистической системы.

4.6 Разработка практических рекомендаций по совершенствованию процессов функционирования угольной компании China Coal

Полученные в диссертации результаты показывают, что повышение эффективности производственно-логистической системы China Coal достигается не только за счёт построения динамической многокритериальной модели и вычислительного получения множества Парето-оптимальных режимов, но и за счёт внедрения управленческого контура, обеспечивающего

воспроизводимое согласование решений по добыче, переработке, транспортировке, складированию и отгрузке на горизонте планирования. Практическая реализация подхода должна опираться на векторную оценку режимов по показателям U и μ , что позволяет сохранять структуру компромисса между альтернативами и выбирать режим из множества Парето-оптимальных решений при фиксированных инженерных границах Ω .

Организация планирования целесообразна в виде регулярного цикла, в рамках которого на каждом шаге актуализируются исходные параметры периода t (заявки E_{kl}^t , ценовые параметры P_{kl}^t , нормативы качества F_{kl} , доступные мощности и начальные запасы), выполняется многокритериальный расчёт с построением Парето-множества, после чего выбирается Парето-оптимальный режим по формальному правилу компромисса, согласованному с политикой планирования (например, по расстоянию до идеальной точки (U_{max}, μ_{max})). Устойчивость выполнения заказов в показателе μ при этом интерпретируется как результат агрегирования по периодам: высокие значения μ достигаются только при стабильно высоком выполнении объёмно-качественных требований на всём горизонте планирования, а не за счёт краткосрочного улучшения в отдельном периоде. Такой регламент фиксирует причинно-следственную связку «решение→состояние→следующее решение», поскольку решения периода t изменяют состояние системы в периоде $t+1$ через балансы и ограничения пропускной способности; межпериодная связанность проявляется прежде всего в динамике запасов на шахтах и перерабатывающих узлах. В результате, планирование рассматривается как управление единым динамическим контуром, а не как совокупность независимых решений по отдельным периодам.

Ключевым элементом внедрения является трактовка запасов как управляемых параметров состояния, обеспечивающих устойчивость выполнения объёмно-качественных заявок потребителей при сезонных колебаниях спроса и ограничениях транспортной пропускной способности. Запасы должны рассматриваться не как пассивный остаток балансов, а как инструмент сглаживания межпериодных диспропорций, когда дефицит мощности в одном периоде компенсируется переносом ресурса и перераспределением потоков при соблюдении складских ёмкостей. Одновременно требуется системный контроль того, чтобы выбранные режимы не формировали скрытую перегрузку узлов сети: формальная допустимость решения в Ω не должна сопровождаться хроническим накоплением запасов или устойчивым «узким местом» по переработке, либо транспортировке, поскольку такие эффекты ухудшают согласованность режимов в динамике и снижают воспроизводимость планов.

Особое значение для China Coal имеет включение технологических связей переработки в управленческий контур, поскольку выпуск товарных марок на обогатительных фабриках определяется не только объёмом входного потока Y_j^t , но и качественными характеристиками

сырья YH_j^t ; данная зависимость задаётся регрессионной параметризацией $L_{jl}^t = f(Y_j^t, YH_j^t)$ (см. п. 3.4 и таблицу 31). В управленческой интерпретации это означает, что решения по маршрутизации потоков «шахта→фабрика» должны приниматься с учётом влияния качества на достижимый выпуск марок и, следовательно, на возможность выполнения требований потребителей по нормативам F_{kl} . При ухудшении качества сырья приоритетным становится не механическое наращивание переработки, а перераспределение подачи между фабриками и корректировка структуры выпуска марок, поскольку именно технологическая связь переработки формирует допустимые траектории выполнения заказов в динамике. Тем самым качество выступает как полноценное инженерное ограничение режима, влияющее на конфигурацию потоков и на структуру допустимой области Ω .

В контуре потребителей целесообразно закреплять дифференциацию направлений поставок «потребитель–марка» по критичности, поскольку агрегирование показателя μ основано на нормировании выполнения заявок и учёте весов, отражающих неоднородность спросовой структуры и значимость направлений поставок в инженерном смысле. При этом методика агрегирования должна использоваться исключительно для вычисления компоненты μ и не интерпретироваться как инструмент априорной скаляризации векторной цели: выбор режима осуществляется после построения Парето-множества, а не до него. Контроль выполнения требований к качеству должен быть встроен в процедуру принятия решения наравне с балансовыми и мощностными ограничениями, поскольку попытка «компенсировать» отклонения качества суммарными объёмами приводит к формально допустимым, но технологически неустойчивым режимам и искажает интерпретацию выполнения заказов.

Для закрепления эффекта оптимизации в практической деятельности целесообразно построить вычислительную процедуру в информационно-аналитический контур планирования, обеспечив связку «входные параметры периода → расчёт Парето-множества → выбор режима → формирование плановых таблиц → контроль исполнения и обновление состояния». Принципиальным требованием является воспроизводимость: каждый план должен сопровождаться фиксацией исходных параметров, идентификатором расчёта и выбранным правилом выбора Парето-оптимального режима, что обеспечивает возможность аудита решений и ретроспективного анализа без потери сопоставимости. В результате предложенные управленческие меры обеспечивают переход от вычислительно найденного решения к реализуемому режиму функционирования производственно-логистической системы China Coal на горизонте планирования.

4.7 Выводы по четвёртой главе

В четвёртой главе выполнена вычислительная реализация динамической многокритериальной модели управления производственно-логистической системой China Coal и проведён численный эксперимент на горизонте планирования $t = 1, \dots, 4$, что позволило сформировать множество Парето-оптимальных решений и перейти от поиска единственного оптимального режима к анализу компромиссов между показателями U и μ в пределах допустимой области Ω .

По результатам расчёта получено множество Парето-оптимальных режимов, отражающее устойчивый компромисс между интегральным показателем ресурсной результативности U и показателем логистической устойчивости и выполнения заказов μ . Для выбора управленчески приемлемого варианта использована процедура постобработки на основе минимизации нормированного расстояния до идеальной точки (U_{max}, μ_{max}) . В результате выделен сбалансированный Парето-оптимальный режим со значениями U 28,3 млрд юаней и μ 0,835, на основе которого сформирован согласованный производственно-логистический план, включающий поквартальные объёмы добычи, переработки и поставок.

Установлено, что улучшение показателя U обеспечивается ростом объёмов добычи и переработки, более полным использованием производственных мощностей и сокращением запасов, тогда как повышение показателя μ связано с увеличением уровня выполнения требований потребителей по объёму поставок и улучшением качества исполнения поставок. Анализ относительных изменений показал, что достигнутый эффект формируется как результат согласованных изменений в добывающей, перерабатывающей, складской и сбытовой подсистемах, а не за счёт экстремального изменения одного параметра.

Тем самым результаты четвёртой главы подтверждают реализуемость разработанной динамической многокритериальной модели и её прикладную значимость для обоснования решений по добыче, переработке, хранению, транспортировке и поставкам в условиях сезонной вариативности спроса и ограничений. Построенное множество Парето-оптимальных решений и выделенный сбалансированный режим могут использоваться как основа для согласования режимов функционирования производственно-логистической системы и выработки практических рекомендаций по совершенствованию деятельности угольной компании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена научная задача разработки и обоснования методического подхода к исследованию режимов функционирования производственно-логистической системы угольной компании Китая в условиях параметрической неопределённости. Решение данной задачи основано на комплексном применении методов системного анализа, энтропийной диагностики параметрической вариативности, статистического прогнозирования и многокритериального моделирования.

Проведён системный анализ состояния угольной отрасли Китая и деятельности компании China Coal, по результатам которого обосновано исследование компании как производственно-логистической системы, объединяющей добычу, переработку, транспортировку, хранение и отгрузку продукции. Установлено, что функционирование данной системы определяется необходимостью согласования производственного и сбытового контуров при вариативности спроса, неоднородности требований к качеству продукции и высокой связанности технологических и логистических процессов.

Выявлены основные структурные связи, ограничения и особенности взаимодействия подсистем производственно-логистической системы China Coal. Установлено, что существенным фактором её функционирования является параметрическая вариативность производственных показателей, формирующая неопределённость последующих решений по переработке, запасам и поставкам продукции. Для количественной оценки указанной вариативности предложен подход, основанный на энтропийном анализе структуры отклонений и статистическом прогнозировании.

Разработана математическая модель функционирования производственно-логистической системы China Coal, в которой добыча, переработка, транспортировка, хранение и отгрузка продукции представлены как взаимосвязанные элементы единой динамической системы. В модели учтены состояние запасов и их временная связанность по периодам, технологическая зависимость результатов переработки от характеристик входного сырья и объёмов переработки, а также ограничения по мощностям, транспортной пропускной способности, ёмкостям хранения и объёмно-качественным требованиям потребителей.

Обоснована многокритериальная постановка задачи, предусматривающая совместный учёт интегрального показателя ресурсной результативности U и показателя логистической устойчивости и выполнения заказов μ . Показано, что указанные критерии отражают различные стороны функционирования производственно-логистической системы, а их прямое сведение к одной скалярной целевой функции требует введения дополнительных весовых предпосылок и может приводить к потере части производственно-логистического цикла.

Осуществлены планирование и проведение вычислительного эксперимента, реализована процедура получения и анализа множества Парето-оптимальных решений с использованием алгоритма NSGA-II как вычислительного инструмента многокритериальной оптимизации. В результате получено множество Парето-оптимальных решений, в состав первого фронта которого вошли 12 альтернатив. На основе минимизации нормированного расстояния до идеальной точки (U_{max}, μ_{max}) выделен сбалансированный Парето-оптимальный режим со значениями U порядка 28,3 млрд юаней и μ порядка 0,835, интерпретируемый как рациональный компромисс между ресурсной результативностью системы и устойчивостью выполнения объёмно-качественных требований потребителей.

Сопоставление исходного производственно-логистического плана China Coal и выбранного сбалансированного Парето-оптимального режима показало, что переход к выбранной стратегии сопровождается увеличением объёма добычи с 55,99 до 57,36 млн т/год, объёма переработки — с 40,84 до 44,11 млн т/год, снижением суммарных запасов угля с 984 до 463 тыс. т и повышением среднего коэффициента использования мощностей с 0,67 до 0,69. Одновременно выполнение требований по объёму поставок возрастает с 80,4 % до 90,8 %, а соответствие качества продукции требованиям потребителей — с 75,7 % до 82,7 %.

Полученные результаты показывают, что интегральный эффект оптимизации формируется не за счёт изменения одного показателя, а как результат согласованных преобразований в нескольких взаимосвязанных подсистемах. Разработанные практические рекомендации направлены на корректировку режимов добычи и переработки, снижение избыточных запасов, согласование производственных объёмов с требованиями потребителей и повышение устойчивости выполнения объёмно-качественных параметров поставок компании China Coal в условиях параметрической неопределённости.

Таким образом, в диссертации последовательно решены поставленные задачи исследования, что позволило перейти от системного описания производственно-логистической системы China Coal к количественной диагностике параметрической вариативности, построению динамической многокритериальной модели и выбору сбалансированного режима её функционирования.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием полученных научных результатов за счёт более детальной дифференциации отдельных открытых угольных разрезов, расширения состава учитываемых внешних воздействий, углубления анализа чувствительности результатов и последующей проверки полученных выводов на фактических данных за новые периоды функционирования компании, а также на материалах других крупных угольных компаний Китая.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Первухин, Д. А. Исследование эффективности добычи на угольных шахтах на основе индекса DEA-Мальмквиста / Д. А. Первухин, **Тан Лиша**, О. В. Афанасьева // Перспективы науки. – 2026. – № 1(196). – С. 23–29.
2. Первухин, Д. А. Методы прогнозирования добычи угля в Китае / Д. А. Первухин, **Тан Лиша**, О. В. Афанасьева // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2025. – Т. 18, № 4. – С. 67–79. DOI: 10.32603/2071–8985-2025-18-4-67-79.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026612115 Российская Федерация. Программа для оценки неопределённости выбросов метана угольных шахт. Заявка № 2026610959: заявл. 22.01.2026: опубл. 26.01.2026 / Д. А. Первухин, **Л. Тан**, Е. В. Григорьев; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 900 КБ.
4. **Тан, Л.** Внутренняя цепь поставок угольной компании Китая как производственно-логистическая система на примере China Coal / **Л. Тан** // Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности, на транспорте и в логистике : Труды XXVI Международной научно-практической конференции молодых учёных, студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 21–23 апреля 2026 г. / под ред. проф. И. Б. Арефьева. – Санкт-Петербург: Медиапир, 2026. – С. 316–321.
5. **Тан, Лиша.** Многокритериальная оптимизация логистической сети крупного угольного предприятия: экономическая эффективность и устойчивое развитие / **Лиша Тан** // Инновации: от теории к практике: сборник научных статей X Международной научно-практической конференции, Брест, 30–31 октября 2025 года. – Брест: Издательство БрГТУ, 2025. – Ч. 1. – С. 186–194.
6. **Тан, Лиша.** Прогнозирование пикового потребления угля в Китае на основе многосценарного моделирования и системного анализа / **Лиша Тан** // Международный форум молодых исследователей: сборник статей III Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 6 ноября 2025 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И. И.), 2025. – С. 234–244.
7. Abdikhadir, Z. Rethinking nonstationarity in time series: a deterministic trend perspective / Z. Abdikhadir, T. T. L. Chong // arXiv. – 2025. – arXiv:2506.07987. – DOI 10.48550/arXiv.2506.07987.
8. Aiassi, R. Designing a stochastic multi-objective simulation-based optimization model for sales and operations planning in built-to-order environment with uncertain distant outsourcing / R. Aiassi [et al.] // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2020. – Vol. 104. – DOI 10.1016/j.simpat.2020.102103.

9. Al-Okaily, M. Sustainable FinTech innovation orientation: a moderated model / M. Al-Okaily [et al.] // Sustainability. – 2021. – Vol. 13, № 24. – DOI 10.3390/su132413591.
10. An, K. Repositioning coal power to accelerate net-zero transition of China's power system / K. An [et al.] // Nature Communications. – 2025. – Vol. 16, № 1. – Article 2311. – DOI 10.1038/s41467-025-57559-2.
11. Anguzu, R. Sources of supply chain volatility: a literature review / R. Anguzu, F. Aila // International Journal of Supply Chain Management. – 2024. – Vol. 9, № 2. – P. 20–36. – DOI 10.47604/ijscm.2370.
12. Asha, L. N. Optimization approaches for multiple conflicting objectives in sustainable green supply chain management / L. N. Asha [et al.] // Sustainability. – 2022. – Vol. 14, № 19. – DOI 10.3390/su141912790.
13. Auger, T. The future of coal investment, trade, and stranded assets / T. Auger [et al.] // Joule. – 2021. – Vol. 5, № 6. – P. 1462–1484. – DOI 10.1016/j.joule.2021.05.008.
14. Bashir, M. F. An outlook on the development of renewable energy, policy measures to reshape the current energy mix, and how to achieve sustainable economic growth in the post COVID-19 era / M. F. Bashir [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. – 2022. – Vol. 29, № 29. – P. 43636–43647. – DOI 10.1007/s11356-022-20010-w.
15. Becerra, P. Green supply chain quantitative models for sustainable inventory management: a review / P. Becerra, J. Mula, R. Sanchis // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 328. – DOI 10.1016/j.jclepro.2021.129544.
16. Bilan, T. The balance and optimization model of coal supply in the flow representation of domestic production and imports: the Ukrainian case study / T. Bilan [et al.] // Energies. – 2022. – Vol. 15, № 21. – DOI 10.3390/en15218103.
17. Bortolini, M. A three-objective optimization model for mid-term sustainable supply chain network design / M. Bortolini [et al.] // Computers and Industrial Engineering. – 2022. – Vol. 168. – DOI 10.1016/j.cie.2022.108131.
18. Borucka, A. Seasonal methods of demand forecasting in the supply chain as support for the company's sustainable growth / A. Borucka // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, № 9. – DOI 10.3390/su15097399.
19. Chen, X. Mathematical modeling and optimization of platform supply chain in the digital era: a systematic review / X. Chen, G. Cheng, Y. He // Mathematics. – 2025. – Vol. 13, № 17. – DOI 10.3390/math13172863.
20. Chen, X. Collaborative innovation evolution of the logistics and manufacturing industry in China / X. Chen, H. Liu // PLoS ONE. – 2023. – Vol. 18, № 6. – DOI 10.1371/journal.pone.0287060.

21. Chen, Z. Q. Optimization of ore production scheduling strategy using NSGA-II-GRA in open-pit mining / Z. Q. Chen [et al.] // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15, № 1. – DOI 10.1038/s41598-025-94775-8.
22. China Energy Investment Corp. Annual Report 2024 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cers.org.cn/?siteid=10000&type=1> (дата обращения: 05.09.2025).
23. China National Coal Association (CNCA) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.coalchina.org.cn/> (дата обращения: 05.09.2025).
24. Chopra, S. Supply chain management. Strategy, planning and operation / S. Chopra, P. Meindl // *Das Summa Summarum des Management*. – 2007. – P. 265–275. – DOI 10.1007/978-3-8349-9320-5_22.
25. Christopher, M. Logistics and supply chain management / M. Christopher. – 5th ed. – Harlow : Pearson Education, 2016.
26. Clark, A. Estimating the employment and fiscal consequences of thermal coal phase-out in China / A. Clark, W. Zhang // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, № 3. – DOI 10.3390/en15030800.
27. Cumming, G. Understanding the new statistics: effect sizes, confidence intervals, and meta-analysis / G. Cumming. – 2013. – 522 p. – DOI 10.4324/9780203807002.
28. Deb, K. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II / K. Deb [et al.] // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. – 2002. – Vol. 6, № 2. – P. 182–197.
29. Demirel, G. Identifying dynamical instabilities in supply networks using generalized modeling / G. Demirel [et al.] // *Journal of Operations Management*. – 2019. – Vol. 65, № 2. – P. 136–159. – DOI 10.1002/joom.1005.
30. Ding, Y. The persistence of flexible coal in a deeply decarbonizing energy system / Y. Ding [et al.] // *Environmental Research Letters*. – 2021. – Vol. 16, № 6. – DOI 10.1088/1748-9326/abfd5a.
31. Du, J. Research on the impact of smart logistics on the manufacturing industry chain resilience / J. Du [et al.] // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15, № 1. – DOI 10.1038/s41598-025-93806-8.
32. Elhay, S. An interior point method applied to flow constraints in a pressure-dependent water distribution system / S. Elhay [et al.] // *Journal of Water Resources Planning and Management*. – 2022. – Vol. 148, № 1. – DOI 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001484.
33. Fan, Y. A review of supply chain risk management: definition, theory, and research agenda / Y. Fan, M. Stevenson // *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. – 2018. – Vol. 48, № 3. – P. 205–230. – DOI 10.1108/IJPDLM-01-2017-0043.
34. Fangjun, L. An empirical study on the impact of China's energy consumption on economic growth under the background of "Dual Carbon" / L. Fangjun, N. Yilin // *Social Sciences*. – 2023. – Vol. 12, № 6. – P. 303–311. – DOI 10.11648/j.ss.20231206.16.

35. Fedorov, V. I. Quality management as a resource to improve the efficiency of coal product supply to consumers in the Far North / V. I. Fedorov, V. L. Gavrilov, N. S. Batugina // *Gornaya Promyshlennost*. – 2025. – № 4S. – P. 146–151. – DOI 10.30686/1609-9192-2025-4S-146-151.
36. Fesobi, B. O. Implementing agile supply chain strategy for improved response to market volatility: a systematic literature review / B. O. Fesobi, M. A. Fesobi, O. Ogungbeje // *South Florida Journal of Development*. – 2024. – Vol. 5, № 12. – Article e4838. – DOI 10.46932/sfjdv5n12-057.
37. Future Think Tank. Analysis of the competitive structure and development prospects of the coal industry: leading companies with a market share of over 40% set the direction for the industry's development [Электронный ресурс] / Future Think Tank. – URL: <https://www.vzkoo.com/read/20250819d8f40a3e0c79207194c12217.html> (дата обращения: 05.09.2025).
38. Gao, S. Coal 2026 annual strategy report: coal's "resilience" and "substance" [Электронный ресурс] / S. Gao, R. Li, B. Liu. – Beijing : Cinda Securities Co., Ltd., 2025. – 48 p. – URL: https://www.cfind.com/pdf/H3_AP202512111798412498_1.pdf (дата обращения: 15.05.2026).
39. Geng, Y. Ecological network construction of coupling spatial carbon emissions in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban agglomeration / Y. Geng, W. Li, R. Yue // *Shengtai Xuebao*. – 2023. – Vol. 43, № 10. – P. 4086–4097. – DOI 10.5846/STXB202205171397.
40. Golan, M. S. Trends and applications of resilience analytics in supply chain modeling: systematic literature review in the context of the COVID-19 pandemic / M. S. Golan, L. H. Jernegan, I. Linkov // *Environment Systems and Decisions*. – 2020. – Vol. 40, № 2. – P. 222–243. – DOI 10.1007/s10669-020-09777-w.
41. Gong, W. The politics of China's just transition and the shift away from coal / W. Gong, J. I. Lewis // *Energy Research & Social Science*. – 2024. – Vol. 115. – Article 103643. – DOI 10.1016/j.erss.2024.103643.
42. Gosens, J. China's decarbonization and energy security plans will reduce seaborne coal imports: results from an installation-level model / J. Gosens, A. B. H. Turnbull, F. Jotzo // *Joule*. – 2022. – Vol. 6, № 4. – P. 782–815. – DOI 10.1016/j.joule.2022.03.008.
43. Gui, D. Risk assessment of port congestion risk during the COVID-19 pandemic / D. Gui, H. Wang, M. Yu // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10, № 2. – DOI 10.3390/jmse10020150.
44. Guo, L. A blockchain and IoT-based lightweight framework for enabling information transparency in supply chain finance / L. Guo [et al.] // *Digital Communications and Networks*. – 2022. – Vol. 8, № 4. – P. 576–587. – DOI 10.1016/j.dcan.2022.03.020.

45. Guo, Y. Supply chain resilience: a review from the inventory management perspective / Y. Guo [et al.] // *Fundamental Research*. – 2025. – Vol. 5, № 2. – P. 450–463. – DOI 10.1016/j.fmre.2024.08.002.
46. He, Z. Robustness assessment of multimodal freight transport networks / Z. He [et al.] // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2021. – Vol. 207. – DOI 10.1016/j.ress.2020.107315.
47. He, Z. The influence of demand fluctuation and competition intensity on advantages of supply chain dominance / Z. He [et al.] // *Mathematics*. – 2023. – Vol. 11, № 24. – DOI 10.3390/math11244931.
48. Hong, P. C. Navigating turbulent global markets for Chinese global firms: a conceptual framework for managing dynamic supply chain complexity / P. C. Hong, M. C. Choi, M. Jalali Sefehri // *Critical Perspectives on International Business*. – 2025. – Vol. 21, № 5. – P. 724. – DOI 10.1108/cpoib-06-2024-0055.
49. International Energy Agency. Coal 2024: analysis and forecast to 2029 [Электронный ресурс] / International Energy Agency. – Paris : IEA, 2024. – URL: <https://www.iea.org/reports/coal-2024> (дата обращения: 05.09.2025).
50. Jahin, M. A. MCDNF: supply chain demand forecasting via an explainable multi-channel data fusion network model / M. A. Jahin, A. Shahriar, M. Al Amin // *Evolutionary Intelligence*. – 2025. – Vol. 18, № 3. – DOI 10.1007/s12065-025-01053-7.
51. Javed, A. H. Analyzing impact of network constraints on feasible operation region of the radial distribution networks / A. H. Javed [et al.] // *Electric Power Systems Research*. – 2024. – Vol. 234. – DOI 10.1016/j.epsr.2024.110799.
52. Jayarathna, C. P. Multi-objective optimization for sustainable supply chain and logistics: a review / C. P. Jayarathna [et al.] // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13, № 24. – DOI 10.3390/su132413617.
53. Jiang, S. Evolutionary dynamic multi-objective optimisation: a survey / S. Jiang [et al.] // *ACM Computing Surveys*. – 2023. – Vol. 55, № 4. – DOI 10.1145/3524495.
54. Jie, D. The future of coal supply in China based on non-fossil energy development and carbon price strategies / D. Jie, X. Xu, F. Guo // *Energy*. – 2021. – Vol. 220. – DOI 10.1016/j.energy.2020.119644.
55. Ju, Y. Measuring the capacity utilization of China's coal industry based on latent class stochastic frontier model / Y. Ju // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 675, № 1. – DOI 10.1088/1755-1315/675/1/012138.
56. Ju, Y. Understanding the capacity utilization rate and overcapacity of China's coal industry and interprovincial heterogeneity / Y. Ju, X. Wang // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 111375–111386. – DOI 10.1109/ACCESS.2019.2933948.
57. Kamiński, M. Shannon entropy in stochastic analysis of some MEMS / M. Kamiński, A. Corigliano // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, № 15. – DOI 10.3390/en15155483.

58. Kaushik, E. Comprehensive overview of power system flexibility during the scenario of high penetration of renewable energy in utility grid / E. Kaushik [et al.] // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, № 2. – DOI 10.3390/en15020516.
59. Khalili-Fard, A. Multi-objective optimization of closed-loop supply chains to achieve sustainable development goals in uncertain environments / A. Khalili-Fard [et al.] // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2024. – Vol. 133. – DOI 10.1016/j.engappai.2024.108052.
60. Kostetska, N. Methodological aspects of assessment the level of industry markets concentration / N. Kostetska, L. Liakhovych // *Galic'kij ekonomičnij visnik*. – 2023. – Vol. 84, № 5. – P. 15–24. – DOI 10.33108/galicianvisnyk_tntu2023.05.015.
61. Krichen, S. Supply chain management and optimization in transportation logistics / S. Krichen // *Advances in Computing and Engineering*. – 2022. – Vol. 2, № 2. – P. 70. – DOI 10.21622/ace.2022.02.2.070.
62. Kunambi, M. M. Optimizing African port hinterland connectivity using Markov processes, max-flow, and traffic flow models: a case study of Dar es Salaam Port / M. M. Kunambi, H. Zheng // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15, № 4. – DOI 10.3390/app15041966.
63. Kvålseth, T. O. Measurement of market (industry) concentration based on value validity / T. O. Kvålseth // *PLoS ONE*. – 2022. – Vol. 17, № 7. – DOI 10.1371/journal.pone.0264613.
64. Lerman, L. V. Smart green supply chain management: a configurational approach to enhance green performance through digital transformation / L. V. Lerman [et al.] // *Supply Chain Management*. – 2022. – Vol. 27, № 7. – P. 147–176. – DOI 10.1108/SCM-02-2022-0059.
65. Li, N. Does market-based environmental regulatory policy improve corporate environmental performance? Evidence from carbon emission trading in China / N. Li [et al.] // *Sustainability*. – 2025. – Vol. 17, № 2. – DOI 10.3390/su17020623.
66. Li, Q. The view of technological innovation in coal industry under the vision of carbon neutralization / Q. Li // *International Journal of Coal Science and Technology*. – 2021. – Vol. 8, № 6. – P. 1197–1207. – DOI 10.1007/s40789-021-00458-w.
67. Li, S. The driving forces behind the change in energy consumption in developing countries / S. Li [et al.] // *Environmental Research Letters*. – 2021. – Vol. 16, № 5. – DOI 10.1088/1748-9326/abde05.
68. Liu, X. Development status of coal industries in the world's major coal-producing countries / X. Liu, G. Song // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2024. – Vol. 124, № 7. – P. 383–386. – DOI 10.17159/2411-9717/1504/2024.
69. Luo, D. Ethical considerations in smart grid optimization: promoting energy equity and fairness / D. Luo, W. Pan // *International Theory and Practice in Humanities and Social Sciences*. – 2025. – Vol. 2, № 2. – P. 145–163. – DOI 10.70693/itphss.v2i2.212.

70. Ma, C. Modelling and evaluating wood supply chain resilience factors based on system dynamics / C. Ma [et al.] // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15, № 1. – DOI 10.1038/s41598-025-00669-0.
71. Mahaboob, B. A treatise on ordinary least squares estimation of parameters of linear model / B. Mahaboob [et al.] // *International Journal of Engineering & Technology*. – 2018. – Vol. 7, № 4.10. – P. 518. – DOI 10.14419/ijet.v7i4.10.21216.
72. Man-zhi, L. The research on modeling of coal supply chain based on object-oriented Petri net and optimization / L. Man-zhi [et al.] // *Procedia Earth and Planetary Science*. – 2009. – Vol. 1, № 1. – P. 1608–1616. – DOI 10.1016/j.proeps.2009.09.248.
73. Mastoi, M. S. A comprehensive analysis of the power demand-supply situation, electricity usage patterns, and the recent development of renewable energy in China / M. S. Mastoi [et al.] // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14, № 6. – DOI 10.3390/su14063391.
74. Maya Rodríguez, G. A new method for the measurement of robustness in reverse logistics supply chains based on entropy and nodal importance / G. Maya Rodríguez, D. Morillo-Torres, J. Willmer Escobar // *Computers and Industrial Engineering*. – 2023. – Vol. 183. – DOI 10.1016/j.cie.2023.109533.
75. Mentzer, J. T. Defining supply chain management / J. T. Mentzer [et al.] // *Journal of Business Logistics*. – 2001. – Vol. 22, № 2. – P. 1–25. – DOI 10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x.
76. Moore, T. A. Defining uncertainty: comparing resource/reserve classification systems for coal and coal seam gas / T. A. Moore, M. C. Friederich // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, № 19. – DOI 10.3390/en14196245.
77. Muttitt, G. Socio-political feasibility of coal power phase-out and its role in mitigation pathways / G. Muttitt [et al.] // *Nature Climate Change*. – 2023. – Vol. 13, № 2. – P. 140–147. – DOI 10.1038/s41558-022-01576-2.
78. Namdar, J. Diversify or concentrate? Supply chain responses to policy uncertainty / J. Namdar, S. Modi, J. Blackhurst // *Journal of Supply Chain Management*. – 2025. – Vol. 61, № 1. – P. 62–82. – DOI 10.1111/jscm.12336.
79. National Bureau of Statistics of China : official website [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.stats.gov.cn/english/> (дата обращения: 11.03.2026).
80. National Development and Reform Commission (NDRC). Policy releases on coal supply, pricing corridors and long-term contracts (2021–2024) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ndrc.gov.cn/> (дата обращения: 05.09.2025).
81. Oliveira, J. B. The role of simulation and optimization methods in supply chain risk management: performance and review standpoints / J. B. Oliveira [et al.] // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2019. – Vol. 92. – P. 17–44. – DOI 10.1016/j.simpat.2018.11.007.

82. Ondov, M. Transport system digitalization in the mining industry / M. Ondov [et al.] // *Sustainability*. – 2025. – Vol. 17, № 13. – DOI 10.3390/su17136038.
83. Oubrahim, I. An integrated multi-criteria decision-making approach for sustainable supply chain performance evaluation from a manufacturing perspective / I. Oubrahim, N. Sefiani // *International Journal of Productivity and Performance Management*. – 2025. – Vol. 74, № 1. – P. 304–339. – DOI 10.1108/IJPPM-09-2023-0464.
84. Peng, H. jun. A dynamic optimization model of an integrated coal supply chain system and its application / H. jun Peng [et al.] // *Mining Science and Technology*. – 2009. – Vol. 19, № 6. – P. 842–846. – DOI 10.1016/S1674-5264(09)60153-8.
85. Peng, J. Key thoughts on the study of eco-geological environment system in Qinling Mountains / J. Peng [et al.] // *Shengtai Xuebao*. – 2023. – Vol. 43, № 11. – P. 4344–4358. – DOI 10.5846/stxb202303310631.
86. Perez, H. D. Integrating information, financial, and material flows in a chemical supply chain / H. D. Perez [et al.] // *Computers and Chemical Engineering*. – 2023. – Vol. 178. – DOI 10.1016/j.compchemeng.2023.108363.
87. Pervukhin, D. A. A Multi-Objective ε -Constraint Optimization of Coal Supply Chain Performance Considering Customer Satisfaction in Multi-layer Logistics Networks / D. A. Pervukhin, **T. Lisha** // *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. – 2026. – Vol. 39, № 7. – P. 1716–1729. – DOI 10.5829/ije.2026.39.07a.15.
88. Petropoulos, F. Operations & supply chain management: principles and practice / F. Petropoulos [et al.] // *International Journal of Production Research*. – 2025. – Vol. 64, № 1. – P. 330–513.
89. Qiao, Y. Recent status of production, administration policies, and low-carbon technology development of China's steel industry / Y. Qiao, G. Wang // *Metals*. – 2024. – Vol. 14, № 4. – DOI 10.3390/met14040480.
90. Rafati, E. The bullwhip effect in supply chains: review of recent development / E. Rafati // *Journal of Future Sustainability*. – 2022. – Vol. 2, № 3. – P. 81–84. – DOI 10.5267/j.jfs.2022.9.007.
91. Rahimdel, M. J. Enhancing mineral transportation systems in underground mines: a framework for capacity analysis / M. J. Rahimdel, R. Mohammadpour // *Heliyon*. – 2025. – Vol. 11, № 4. – DOI 10.1016/j.heliyon.2025.e42708.
92. Rajaram, R. On the entropy-based localization of inequality in probability distributions / R. Rajaram, N. Ritchey, B. Castellani // *Entropy*. – 2025. – Vol. 27, № 9. – DOI 10.3390/e27090945.
93. El Raoui, H. Coupling soft computing, simulation and optimization in supply chain applications: review and taxonomy / H. El Raoui, M. Oudani, A. El Hilali Alaoui // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 31710–31732. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.2973329.

94. Rocks, J. W. Revealing structure-function relationships in functional flow networks via persistent homology / J. W. Rocks, A. J. Liu, E. Katifori // *Physical Review Research*. – 2020. – Vol. 2, № 3. – DOI 10.1103/PhysRevResearch.2.033234.
95. Rocks, J. W. Hidden topological structure of flow network functionality / J. W. Rocks, A. J. Liu, E. Katifori // *Physical Review Letters*. – 2021. – Vol. 126, № 2. – DOI 10.1103/PhysRevLett.126.028102.
96. Sa, N. Coupling mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands-sandlands life community: framework, models and prospect / N. Sa [et al.] // *Shengtai Xuebao*. – 2023. – Vol. 43, № 11. – P. 4333–4343. – DOI 10.5846/stxb202301150099.
97. Sarkar, P. Strategic decision-making for sustainable production and distribution in automotive industry: a machine learning enabled dynamic multi-objective optimisation / P. Sarkar, V. B. Khanapuri, M. K. Tiwari // *International Journal of Production Research*. – 2025. – Vol. 63, № 7. – P. 2339–2362. – DOI 10.1080/00207543.2024.2403111.
98. Sarychev, A. E. Enhancing the role of dynamic capabilities of the coal companies under the conditions of sharp price fluctuations at the international markets / A. E. Sarychev [et al.] // *Russian Journal of Industrial Economics*. – 2024. – Vol. 17, № 2. – P. 128–137. – DOI 10.17073/2072-1633-2024-2-1201.
99. Seraya, N. Features of ash and slag formation during incomplete combustion of coal from the Karazhyra deposit in small- and medium-scale power plants / N. Seraya [et al.] // *Processes*. – 2025. – Vol. 13, № 8. – DOI 10.3390/pr13082467.
100. Seyedzadeh, Z. Towards a sustainable viticultural supply chain under uncertainty: integration of data envelopment analysis, artificial neural networks, and a multi-objective optimization model / Z. Seyedzadeh, M. S. Jabalameli, E. Dehghani // *Science of the Total Environment*. – 2025. – Vol. 970. – Article 178980. – DOI 10.1016/j.scitotenv.2025.178980.
101. Shahzad, S. Renewable revolution: a review of strategic flexibility in future power systems / S. Shahzad, E. Jasińska // *Sustainability*. – 2024. – Vol. 16, № 13. – DOI 10.3390/su16135454.
102. Sharma, R. R. EVDHM-ARIMA-based time series forecasting model and its application for COVID-19 cases / R. R. Sharma [et al.] // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2021. – Vol. 70. – DOI 10.1109/TIM.2020.3041833.
103. Shu, Y. Building a new electric power system based on new energy sources / Y. Shu [et al.] // *Strategic Study of CAE*. – 2021. – Vol. 23, № 6. – P. 61–69. – DOI 10.15302/j-sscae-2021.06.003.
104. Singh, A. K. Prediction of intermittent demand occurrence using machine learning / A. K. Singh, J. B. Simha, R. Agarwal // *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*. – 2024. – Vol. 10. – DOI 10.4108/eetiot.5381.

105. Su, Y. Renewable energy technology innovation, industrial structure upgrading and green development from the perspective of China's provinces / Y. Su, Q. Fan // *Technological Forecasting and Social Change*. – 2022. – Vol. 180. – DOI 10.1016/j.techfore.2022.121727.

106. Sufiyan, M. Evaluating food supply chain performance using hybrid fuzzy MCDM technique / M. Sufiyan [et al.] // *Sustainable Production and Consumption*. – 2019. – Vol. 20. – P. 40–57. – DOI 10.1016/j.spc.2019.03.004.

107. Sugiarto, W. The impact of total moisture and ash on calorific value: coal research in Berau Sub-Basin, East Kalimantan / W. Sugiarto [et al.] // *KURVATEK*. – 2025. – Vol. 10, № 1. – P. 1–8. – DOI 10.33579/krvtk.v10i1.5519.

108. **Tang, Lisha**. Enhancing Operational Efficiency in Coal Enterprises Through Capacity Layout Optimisation: A Cost-Effectiveness Analysis / **Lisha Tang**, D. A. Pervukhin // *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*. – 2024. – Vol. 7, Issue 3. – P. 144–167. – DOI 10.5281/zenodo.15093139.

109. Tian, H. Dynamic operation optimization of complex industries based on a data-driven strategy / H. Tian [et al.] // *Processes*. – 2024. – Vol. 12, № 1. – DOI 10.3390/pr12010189.

110. Trisna, T. Multi-objective optimization for supply chain management problem: a literature review / T. Trisna [et al.] // *Decision Science Letters*. – 2016. – Vol. 5. – P. 283–316. – DOI 10.5267/j.dsl.2015.10.003.

111. Wang, H. A joint model of location, inventory and third-party logistics provider in supply chain network design / H. Wang [et al.] // *Computers and Industrial Engineering*. – 2022. – Vol. 174. – DOI 10.1016/j.cie.2022.108809.

112. Wang, K. Tracking carbon flows in China's iron and steel industry / K. Wang [et al.] // *Environmental Science and Technology*. – 2023. – Vol. 57, № 31. – P. 11510–11519. – DOI 10.1021/ACS.EST.3C02624.

113. Wang, P. Power system reliability assessment considering coal-fired unit peaking characteristics / P. Wang [et al.] // *Algorithms*. – 2025. – Vol. 18, № 4. – DOI 10.3390/a18040197.

114. Wang, S. Determination of production capacity for open-pit coal mines under uncertainty: a model based on economies of scale / S. Wang [et al.] // *PLoS ONE*. – 2025. – Vol. 20, № 1. – DOI 10.1371/journal.pone.0312130.

115. Wang, W. Has China's coal consumption really peaked? Prediction and scenario analysis of China's coal consumption peak under the double-carbon target / W. Wang [et al.] // *Frontiers in Environmental Science*. – 2022. – Vol. 10. – DOI 10.3389/fenvs.2022.974763.

116. Wang, X. Production process optimization of metal mines considering economic benefit and resource efficiency using an NSGA-II model / X. Wang [et al.] // *Processes*. – 2018. – Vol. 6, № 11. – DOI 10.3390/pr6110228.

117. Wang, X. Green supply chain for coal: models and optimization / X. Wang [et al.] // *Cleaner Logistics and Supply Chain*. – 2025. – Vol. 14. – Article 100206. – DOI 10.1016/j.clscn.2025.100206.
118. Wang, Y. An efficient scheduling method in supply chain logistics based on network flow / Y. Wang [et al.] // *Processes*. – 2025. – Vol. 13, № 4. – DOI 10.3390/pr13040969.
119. Wei, W. Evaluating the coal rebound effect in energy intensive industries of China / W. Wei [et al.] // *Energy*. – 2020. – Vol. 207. – DOI 10.1016/j.energy.2020.118247.
120. Xu, F. The status and development strategy of coalbed methane industry in China / F. Xu [et al.] // *Petroleum Exploration and Development*. – 2023. – Vol. 50, № 4. – P. 765–783. – DOI 10.1016/S1876-3804(23)60427-6.
121. Xu, L. Robust optimization model with shared uncertain parameters in multi-stage logistics production and inventory process / L. Xu, Y. Zhou, B. Yu // *Mathematics*. – 2020. – Vol. 8, № 2. – DOI 10.3390/math8020211.
122. Xu, X. Reforming global supply chain management under pandemics: the GREAT-3Rs framework / X. Xu [et al.] // *Production and Operations Management*. – 2023. – Vol. 32, № 2. – P. 524–546. – DOI 10.1111/poms.13885.
123. Yang, Q. System simulation and policy optimization of China's coal production capacity deviation in terms of the economy, environment, and energy security / Q. Yang [et al.] // *Resources Policy*. – 2021. – Vol. 74. – DOI 10.1016/j.resourpol.2021.102314.
124. Yang, R. Low-carbon transformation of China's coal-fired power industry: current situation insights and trend prospects / R. Yang // *Frontiers in Environmental Research*. – 2025. – Vol. 3, № 1. – P. 26–31. – DOI 10.61784/fer3015.
125. Yinnan, H. Consistent or inconsistent? The club convergence effect and matching degree analysis on energy consumption intensity and production density: evidence from the data of 2000–2020 in China / H. Yinnan, Q. Ruxiang, W. Bangjun // *Energy Strategy Reviews*. – 2023. – Vol. 50. – DOI 10.1016/j.esr.2023.101223.
126. You, Q. Multi-dimensional safety risk assessment on coal mines under the profitability dilemma / Q. You [et al.] // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13, № 1. – DOI 10.1038/s41598-023-29795-3.
127. Yu, S. A multi-objective decision model for investment in energy savings and emission reductions in coal mining / S. Yu [et al.] // *European Journal of Operational Research*. – 2017. – Vol. 260, № 1. – P. 335–347. – DOI 10.1016/j.ejor.2016.12.023.
128. Yu, Z. Strategies for the resilience of power-coal supply chains in low-carbon energy transition: a system dynamics model and scenario analysis of China up to 2060 / Z. Yu, Z. Li, L. Ma // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15, № 9. – DOI 10.3390/SU15097154.

129. Zhang, B. Assessing the efforts of coal phaseout for carbon neutrality in China / B. Zhang [et al.] // *Applied Energy*. – 2023. – Vol. 352. – DOI 10.1016/j.apenergy.2023.121924.
130. Zhang, C. Characteristics of coal resources in China and statistical analysis and preventive measures for coal mine accidents / C. Zhang [et al.] // *International Journal of Coal Science and Technology*. – 2023. – Vol. 10, № 1. – DOI 10.1007/s40789-023-00582-9.
131. Zhang, J. Production change optimization model of nonlinear supply chain system under emergencies / J. Zhang, Y. Wu, Q. Li // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, № 7. – DOI 10.3390/s23073718.
132. Zhang, L. Directions for sustainable development of China's coal industry in the post-epidemic era / L. Zhang, T. Ponomarenko // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15, № 8. – DOI 10.3390/SU15086518.
133. Zhang, W. The supply-demand gap may gradually widen, and the coal industry may usher in a new round of value reassessment : in-depth report on the coal industry [Электронный ресурс] / W. Zhang. – Huaxin Securities, 2025. – 30 p. – URL: https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202507291717937908_1.pdf?1753860736000.pdf (дата обращения: 15.05.2026).
134. Zhang, Z. Joint optimization of inventory and schedule for coal heavy rail considering production–transportation–sales collaboration: a spatio-temporal-mode / Z. Zhang [et al.] // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, № 12. – DOI 10.3390/app14125089.
135. Zhou, J. The ranking of the top ten raw coal producers in 2025 has been released [Электронный ресурс] / J. Zhou // China Coal Industry Association. – URL: <https://www.cctd.com.cn/show-361-253049-1.html> (дата обращения: 15.05.2026).
136. Zinciri, T. Supply chain optimization studies: a literature review and classification / T. Zinciri [et al.] // *Dogus University Journal*. – 2018. – Vol. 19, № 1. – P. 79–98.
137. Zuo, M. Research on reserve classification of solid mineral resources in China and western countries / M. Zuo, T. Wang // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 631, № 1. – DOI 10.1088/1755-1315/631/1/012044.
138. Zuo, Z. Comparative study on relative fossil energy carrying capacity in China and the United States / Z. Zuo [et al.] // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, № 10. – DOI 10.3390/en14102972.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Описание и программная реализация многокритериальной динамической модели функционирования производственно-логистической системы в среде MATLAB

А.1. Общая характеристика программной реализации

Вычислительная реализация динамической многокритериальной модели управления производственно-логистической системой China Coal выполнена в среде MATLAB с использованием функции gamultiobj, реализующей алгоритм NSGA-II. Программная реализация ориентирована не на разработку нового эволюционного алгоритма, а на адаптацию стандартного вычислительного механизма к структуре рассматриваемой задачи.

В рамках программной реализации были заданы вектор управляемых переменных, целевые функции U и μ , система ограничений, процедура проверки допустимости решений и правила постобработки множества Парето-оптимальных альтернатив. Вычислительная схема обеспечивает построение множества недоминируемых решений в пространстве показателей (U, μ) при соблюдении инженерных ограничений, сформулированных в главе 3.

Программная реализация включает следующие основные модули:

1. Модуль подготовки исходных данных и параметров модели;
2. Модуль декодирования вектора решения;
3. Модуль вычисления целевых функций;
4. Модуль проверки ограничений;
5. Модуль запуска процедуры NSGA-II;
6. Модуль постобработки множества Парето-оптимальных решений.

А.2. Структура вектора решения

Каждый режим функционирования системы кодируется в виде вектора управляемых переменных

$$x = \{X_i^t, X_{ij}^t, Y_j^t, L_{jl}^t, V_i^t, R_{jl}^t, Z_{jkl}^t, Z_{ik0}^t, Q_{kl}^t\}_{t=1, \dots, T},$$

где: X_i^t — объём добычи на i -й шахте в период t ;

X_{ij}^t — объём потока с i -й шахты на j -ю фабрику;

Y_j^t — объём переработки на j -й фабрике;

L_{jl}^t — выпуск товарной марки l на j -й фабрике;

V_i^t — запас рядового угля на i -й шахте;

R_{jl}^t — запас продукции марки l на j -й фабрике;

Z_{jkl}^t — объём поставки продукции марки l потребителю k в период t ;

Z_{ik0}^t — объём поставки исходного угля потребителю k непосредственно с i -й шахты;

Q_{kl}^t — совокупный объём поставки продукции марки l потребителю k в период t .

Внутри вычислительной процедуры указанные переменные хранятся в линейной форме, а затем преобразуются в матрицы и тензоры, соответствующие исходной математической постановке.

А.3. Принцип вычисления целевых функций

В программной реализации используются две целевые функции.

Первая целевая функция соответствует интегральному показателю ресурсной результативности U и учитывает доход от поставок, затраты на добычу, переработку, транспортировку и хранение.

Вторая целевая функция соответствует показателю логистической устойчивости и выполнения заказов μ и формируется как агрегированная оценка выполнения требований потребителей по объёму поставок и по качеству продукции.

Поскольку функция `gamultiobj` в MATLAB решает задачу минимизации, в программной реализации используются преобразованные формы целевых функций:

Такое преобразование не изменяет содержательной постановки задачи и позволяет использовать стандартный вычислительный механизм NSGA-II для поиска множества Парето-оптимальных решений.

А.4. Проверка ограничений и инженерная реализуемость

Для обеспечения инженерной реализуемости кандидатов в программной реализации используется система ограничений, соответствующая математической модели главы 3. Проверяются:

- балансовые соотношения по шахтам;
- балансовые соотношения по обогатительным фабрикам;
- ограничения по мощностям добычи;
- ограничения по мощностям переработки;
- ограничения по складским ёмкостям;
- ограничения по спросу;
- ограничения по качеству.

Для оценки общей степени нарушения ограничений используется скалярная мера

$$CV(x) = \sum_i \max\{0, g_i(x)\} + \sum_j |h_j(x)|,$$

где $g_i(x)$ — ограничения-неравенства, $h_j(x)$ — ограничения-равенства. При сравнении решений предпочтение получают решения с меньшим значением $CV(x)$. При $CV(x) = 0$ используется стандартная процедура NSGA-II по недоминирующей сортировке и метрике crowding distance.

А.5. Основные параметры вычислительного запуска

Воспроизводимость вычислительного эксперимента обеспечивается фиксированием:

- структуры переменных решения;
- нижних и верхних границ переменных;
- параметров запуска NSGA-II;
- начального значения генератора псевдослучайных чисел.

В программной реализации используются следующие параметры:

N_{pop} — размер популяции;

N_{gen} — число поколений;

p_c — вероятность кроссовера;

p_m — вероятность мутации;

$seed$ — значение генератора случайных чисел.

Конкретные значения указанных параметров задаются единообразно для всех вычислительных серий и соответствуют настройкам, приведённым в разделе 4.4.

А.6. Основные фрагменты программной реализации

А.6.1. Главный модуль запуска

```
function run_nsga2_chinacoal()
    clc; clear; close all;
    % Воспроизводимость
    rng(2026,'twister');
    % Загрузка исходных данных
    data = build_problem_data();
    % Число переменных и границы
    nvars = data.nvars;
    lb = data.lb;
    ub = data.ub;
    % Целевые функции и ограничения
    objFun = @(x) objective_chinacoal(x,data);
    conFun = @(x) nonlcon_chinacoal(x,data);
    % Настройки NSGA-II
    options = optimoptions('gamultiobj', ...
        'PopulationSize', 200, ...
        'MaxGenerations', 300, ...
        'CrossoverFraction', 0.8, ...
        'FunctionTolerance', 1e-6, ...
        'UseParallel', false, ...
        'Display', 'iter', ...
```

```

    'PlotFcn', {@gaplotpareto});
% Запуск многокритериальной оптимизации
[X, FVAL] = gamultiobj(objFun, nvars, [], [], [], [], lb, ub, conFun, options);
% Восстановление исходных значений критериев
U_vals = -FVAL(:,1);
mu_vals = -FVAL(:,2);
% Идеальная точка
U_max = max(U_vals);
mu_max = max(mu_vals);
U_min = min(U_vals);
mu_min = min(mu_vals);
% Выбор репрезентативного режима
d = sqrt(((U_max - U_vals)./max(U_max - U_min, eps)).^2 + ...
          ((mu_max - mu_vals)./max(mu_max - mu_min, eps)).^2);
[~, idxBest] = min(d);
bestX = X(idxBest,:);
bestU = U_vals(idxBest);
bestMu = mu_vals(idxBest);
% Сохранение результатов
results.X = X;
results.U = U_vals;
results.mu = mu_vals;
results.bestX = bestX;
results.bestU = bestU;
results.bestMu = bestMu;
save('results_chinacoal_nsga2.mat','results');
end

```

А.6.2. Модуль вычисления целевых функций

```

function f = objective_chinacoal(x,data)
    sol = decode_solution(x,data);

    T = data.T;
    I = data.I;
    J = data.J;
    K = data.K;

```

```
L = data.L;
```

```
Pk1 = data.Pk1;
```

```
Ci0 = data.Ci0;
```

```
Cj1 = data.Cj1;
```

```
Sij = data.Sij;
```

```
Cl2 = data.Cl2;
```

```
C02 = data.C02;
```

```
theta = data.theta;
```

```
gamma1 = data.gamma1;
```

```
gamma2 = data.gamma2;
```

```
rho = data.rho;
```

```
E = data.E;
```

```
Freq = data.Freq;
```

```
Xit = sol.Xit;
```

```
Xijt = sol.Xijt;
```

```
Yjt = sol.Yjt;
```

```
Ljlt = sol.Ljlt;
```

```
Vit = sol.Vit;
```

```
Rjlt = sol.Rjlt;
```

```
Qklt = sol.Qklt;
```

```
AHklt = sol.AHklt;
```

```
% --- Показатель U ---
```

```
U = 0;
```

```
for t = 1:T
```

```
    revenue = sum(sum(Qklt(:,t) .* Pk1));
```

```
    miningCost = 0;
```

```
    for i = 1:I
```

```
        miningCost = miningCost + Xit(i,t) * Ci0(i);
```

```
    end
```

```

processingCost = 0;
for j = 1:J
    processingCost = processingCost + Yjt(j,t) * Cj1(j);
end

transportCost = 0;
for i = 1:I
    for j = 1:J
        transportCost = transportCost + Xijt(i,j,t) * Sij(i,j);
    end
end

% Расчёт стоимости хранения на фабриках
plantStorage = 0;
for j = 1:J
    for l = 1:L
        if t == 1
            Rprev = data.R0(j,l);
        else
            Rprev = Rjlt(j,l,t-1);
        end
        plantStorage = plantStorage + Cl2(l) * (Rjlt(j,l,t) + Rprev) / 2;
    end
end

% Расчёт стоимости хранения на шахтах
mineStorage = 0;
for i = 1:I
    if t == 1
        Vprev = data.V0(i);
    else
        Vprev = Vit(i,t-1);
    end
    mineStorage = mineStorage + C02 * (Vit(i,t) + Vprev) / 2;
end

```

```

end

U = U + revenue - miningCost - processingCost - transportCost ...
    - plantStorage - mineStorage;
end

% --- Показатель mu ---
mu = 0;
for t = 1:T
    for k = 1:K
        quantityPart = 0;
        qualityPart = 0;

        for l = 1:L
            if E(k,l,t) > 0
                quantityPart = quantityPart + rho(l) * (Qklt(k,l,t) / E(k,l,t));
            end

            qualityPart = qualityPart + rho(l) * ...
                (1 - (AHklt(k,l,t) - Freq(k,l)) / max(Freq(k,l),eps));
        end

        mu = mu + theta(k) * (gamma1 * quantityPart + gamma2 * qualityPart);
    end
end

% gamultiobj минимизирует
f = [-U, -mu];
end

```

А.6.3. Модуль проверки ограничений

```

function [c,ceq] = nonlcon_chinacoal(x,data)
    sol = decode_solution(x,data);

    T = data.T;

```

```

I = data.I;
J = data.J;
K = data.K;
L = data.L;

A    = data.A;
B    = data.B;
Vmax = data.Vmax;
Rmax = data.Rmax;
E    = data.E;
Freq = data.Freq;
alpha = data.alpha;

Xit  = sol.Xit;
Xijt = sol.Xijt;
Yjt  = sol.Yjt;
Ljlt = sol.Ljlt;
Vit  = sol.Vit;
Rjlt = sol.Rjlt;
Qklt = sol.Qklt;
AHklt = sol.AHklt;

c = [];
ceq = [];

% Ограничения по мощностям и запасам
for t = 1:T
    for i = 1:I
        c(end+1,1) = Xit(i,t) - A(i);
        c(end+1,1) = Vit(i,t) - Vmax(i);
    end
    for j = 1:J
        c(end+1,1) = Yjt(j,t) - B(j);
        for l = 1:L
            c(end+1,1) = Rjlt(j,l,t) - Rmax(j,l);

```

```

        end
    end
end

% Ограничения спроса и качества
for t = 1:T
    for k = 1:K
        for l = 1:L
            c(end+1,1) = Qklt(k,l,t) - E(k,l,t);
            c(end+1,1) = AHklt(k,l,t) - Freq(k,l);
        end
    end
end

% Баланс по шахтам
for t = 1:T
    for i = 1:I
        if t == 1
            Vprev = data.V0(i);
        else
            Vprev = Vit(i,t-1);
        end
        ceq(end+1,1) = Vit(i,t) - (Vprev + Xit(i,t) - sum(Xijt(i,:,t)));
    end
end

% СВЯЗЬ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ
for t = 1:T
    for j = 1:J
        ceq(end+1,1) = Yjt(j,t) - sum(Xijt(:,j,t));
    end
end

% Выпуск товарных марок (упрощённая форма)
for t = 1:T

```

```

for j = 1:J
    for l = 1:L
        ceq(end+1,1) = Ljlt(j,l,t) - alpha(j,l)*Yjt(j,t);
    end
end
end

% Баланс продукции на фабриках
for t = 1:T
    for l = 1:L
        totalQ = sum(Qklt(:,l,t));
        totalL = sum(Ljlt(:,l,t));
        totalR = sum(Rjlt(:,l,t));

        if t == 1
            totalRprev = sum(data.R0(:,l));
        else
            totalRprev = sum(Rjlt(:,l,t-1));
        end

        ceq(end+1,1) = totalR - (totalRprev + totalL - totalQ);
    end
end
end

```

A.6.4. Модуль подготовки исходных данных

```
function data = build_problem_data()
```

```

data.T = 4;
data.I = 10;
data.J = 10;
data.K = 5;
data.L = 4;

```

```

T = data.T;
I = data.I;
J = data.J;

```

```

K = data.K;
L = data.L;

% Пример задания параметров
data.A = 10*ones(I,1);
data.B = 8*ones(J,1);
data.Vmax = 2*ones(I,1);
data.Rmax = 2*ones(J,L);

data.Ci0 = 100 + 20*rand(I,1);
data.Cj1 = 30 + 5*rand(J,1);
data.Sij = 10 + 3*rand(I,J);
data.CI2 = [5 6 4 4]';
data.CO2 = 3;

data.Pk1 = 400 + 100*rand(K,L);
data.E = 1 + 3*rand(K,L,T);
data.Freq = repmat([30 8.5 17 17],K,1);

data.theta = [0.4 0.3 0.2 0.1 0.1]';
data.gamma1 = 0.65;
data.gamma2 = 0.35;
data.rho = [0.15 0.30 0.30 0.25]';

data.V0 = 0.5*ones(I,1);
data.R0 = 0.2*ones(J,L);

data.alpha = rand(J,L);
data.alpha = data.alpha ./ sum(data.alpha,2);

% Размерность вектора решения
nXit = I*T;
nXijt = I*J*T;
nYjt = J*T;
nLjlt = J*L*T;

```

```

nVit    = I*T;
nRjlt   = J*L*T;
nQklt   = K*L*T;
nAHklt  = K*L*T;

data.idx.Xit = 1:nXit;
s = nXit;
data.idx.Xijt = s + (1:nXijt); s = s + nXijt;
data.idx.Yjt  = s + (1:nYjt);  s = s + nYjt;
data.idx.Ljlt = s + (1:nLjlt); s = s + nLjlt;
data.idx.Vit  = s + (1:nVit);  s = s + nVit;
data.idx.Rjlt = s + (1:nRjlt); s = s + nRjlt;
data.idx.Qklt = s + (1:nQklt); s = s + nQklt;
data.idx.AHklt = s + (1:nAHklt); s = s + nAHklt;

data.nvars = s;

data.lb = zeros(data.nvars,1);
data.ub = inf(data.nvars,1);

```

end

A.6.5. Модуль декодирования решения

```

function sol = decode_solution(x,data)
    I = data.I;
    J = data.J;
    K = data.K;
    L = data.L;
    T = data.T;

    sol.Xit    = reshape(x(data.idx.Xit),  [I,T]);
    sol.Xijt   = reshape(x(data.idx.Xijt), [I,J,T]);
    sol.Yjt    = reshape(x(data.idx.Yjt),  [J,T]);
    sol.Ljlt   = reshape(x(data.idx.Ljlt), [J,L,T]);
    sol.Vit    = reshape(x(data.idx.Vit),  [I,T]);
    sol.Rjlt   = reshape(x(data.idx.Rjlt), [J,L,T]);
    sol.Qklt   = reshape(x(data.idx.Qklt), [K,L,T]);

```

```
sol.AHklt = reshape(x(data.idx.AHklt), [K,L,T]);  
end
```

Приведённые выше фрагменты программной реализации имеют характер укрупнённой воспроизводимой схемы и отражают общую организацию вычислительного эксперимента. В окончательной версии расчётов отдельные блоки, связанные с параметризацией выпуска товарных марок, вычислением показателей качества поставок и подготовкой исходных данных, адаптируются к фактической информационной базе China Coal и к системе уравнений, использованной в основной части диссертационной работы.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Помесячные данные по объемам и параметрам продукции обогатительных фабрик

Таблица Б.1 — Антайбао, фабрика I — Месячные производственные показатели (составлено автором по данным компании)

Месяц	Вход. уголь Количество	Зольность (вход)	Концентрат Выпуск	Извлечение	Зольность концентрация	Отвалы Количество
2023-01	690	29,5	459	66,5	16,9	27,5
02	670	29,0	442	66,0	16,8	27,8
03	630	28,3	403	64,0	16,6	28,6
04	590	29,6	372	63,0	16,5	29,2
05	580	29,9	365	63,0	16,4	29,3
06	605	30,5	387	64,0	16,5	28,8
07	625	31,4	403	64,5	16,9	29,6
08	645	31,8	419	65,0	17,1	29,7
09	655	30,8	429	65,5	16,7	28,9
10	640	29,7	416	65,0	16,5	28,4
11	665	29,0	436	65,6	16,6	28,1
12	705	28,6	469	66,5	16,8	27,6
2024-01	700	29,1	466	66,5	16,9	27,6
02	675	28,8	447	66,2	16,8	27,8
03	635	28,2	408	64,2	16,6	28,5
04	595	29,5	376	63,2	16,4	29,1
05	585	29,8	369	63,1	16,3	29,2
06	610	30,3	392	64,3	16,5	28,7
07	628	31,2	406	64,6	16,9	29,5
08	648	31,7	421	65,0	17,2	29,7
09	658	30,6	431	65,5	16,7	28,9
10	643	29,6	418	65,1	16,5	28,3
11	668	28,9	438	65,6	16,6	28,1
12	708	28,5	471	66,5	16,8	27,6

Таблица Б.2 — Антайбао, фабрика II — Месячные производственные показатели (составлено автором по данным компании)

Месяц	Вход, уголь Количество	Зольность (вход)	Концентрат Выпуск	Извлечение	Зольность концентрация	Отвалы Количество
2023-01	680	29,7	451	66,3	16,9	27,7
02	660	29,2	435	66,0	16,8	27,9
03	625	28,5	400	64,0	16,6	28,7
04	585	29,8	369	63,1	16,4	29,2
05	575	30,1	362	63,0	16,3	29,3
06	600	30,7	384	64,0	16,5	28,8
07	620	31,6	400	64,5	16,9	29,6
08	640	32,0	416	65,0	17,1	29,8
09	650	31,0	426	65,5	16,7	28,9
10	635	29,9	414	65,2	16,5	28,4
11	660	29,1	432	65,5	16,6	28,2

Продолжение таблицы Б.2

Месяц	Вход, уголь Количество	Зольность (вход)	Концентрат Выпуск	Извлечение	Зольность концентрация	Отвалы Количество
2023-12	700	28,7	465	66,4	16,8	27,7
2024-01	695	29,3	461	66,3	16,9	27,7
02	670	28,9	443	66,1	16,8	27,9
03	630	28,3	405	64,3	16,6	28,6
04	590	29,7	373	63,2	16,4	29,1
05	580	30,0	366	63,1	16,3	29,2
06	605	30,6	389	64,3	16,5	28,7
07	623	31,5	402	64,6	16,9	29,5
08	643	31,9	418	65,0	17,2	29,7
09	653	30,8	428	65,5	16,7	28,9
10	638	29,8	416	65,2	16,5	28,4
11	663	29,0	434	65,6	16,6	28,2
12	703	28,6	467	66,5	16,8	27,6

Таблица Б.3 — Ванцзялин, фабрика III — Месячные производственные показатели (составлено автором по данным компании)

Месяц	Вход, уголь Количество	Зольность (вход)	Концентрат Выпуск	Извлечение	Зольность концентрация	Отвалы Количество
2023-01	278	34,8	142	51,1	17,2	27,6
02	270	34,9	138	51,0	17,3	27,8
03	252	35,7	126	50,0	17,5	28,5
04	245	35,6	122	49,8	17,6	28,7
05	238	36,0	118	49,6	17,8	29,0
06	230	36,5	113	49,1	18,1	29,3
07	225	36,6	110	48,9	18,2	29,5
08	231	36,5	114	49,4	18,1	29,3
09	248	35,9	123	49,6	17,7	28,8
10	255	35,6	128	50,2	17,5	28,4
11	265	35,3	133	50,3	17,4	28,1
12	282	34,7	142	50,4	17,1	27,9
2024-01	285	34,5	146	51,2	17,0	27,7
02	276	34,7	142	51,4	17,1	27,9
03	258	35,4	129	50,0	17,3	28,5
04	248	35,3	124	50,0	17,4	28,6
05	241	35,7	121	50,2	17,6	28,8
06	233	36,2	116	49,8	17,8	29,1
07	228	36,3	113	49,6	18,0	29,3
08	234	36,2	117	50,0	17,9	29,0
09	251	35,6	126	50,2	17,6	28,6
10	258	35,3	130	50,4	17,5	28,3
11	269	35,0	136	50,6	17,3	28,0
12	287	34,4	147	51,2	17,0	27,8

Таблица Б.4 — Яоцяо, фабрика IV — Месячные производственные показатели (составлено автором по данным компании)

Месяц	Вход, уголь Количество	Зольность (вход)	Концентрат Выпуск	Извлечение	Зольность концентрация	Отвалы Количество
2023-01	188	31,2	104	55,3	15,8	26,9
02	182	31,3	100	54,9	15,9	27,2
03	170	31,9	93	54,7	16,0	27,4
04	165	32,0	90	54,5	16,1	27,6
05	160	32,3	86	54,0	16,3	27,9
06	154	32,7	82	53,5	16,5	28,3
07	150	32,8	80	53,3	16,6	28,5
08	153	32,7	82	53,6	16,5	28,2
09	166	32,2	90	54,0	16,2	27,9
10	170	32,0	92	54,2	16,1	27,7
11	178	31,8	97	54,5	15,9	27,4
12	190	31,1	104	54,7	15,8	27,2
2024-01	192	31,0	107	55,7	15,7	26,8
02	186	31,1	103	55,4	15,8	26,9
03	172	31,7	94	54,7	16,0	27,3
04	167	31,8	91	54,5	16,1	27,5
05	162	32,1	88	54,3	16,3	27,7
06	156	32,5	84	53,8	16,5	28,1
07	152	32,6	82	53,9	16,6	28,2
08	155	32,5	84	54,2	16,5	28,0
09	168	32,0	91	54,3	16,2	27,7
10	172	31,8	93	54,5	16,1	27,5
11	180	31,6	98	54,7	15,9	27,3
12	194	30,9	106	54,6	15,7	27,0

Таблица Б.5 — Сюйчжуан, фабрика V — Месячные производственные показатели (составлено автором по данным компании)

Месяц	Вход, уголь Количество	Зольность (вход)	Концентрат Выпуск	Извлечение	Зольность концентрация	Отвалы Количество
2023-01	160	30,0	104	65,0	11,8	29,0
02	150	29,7	96	64,0	11,7	29,3
03	140	29,2	90	64,3	11,6	29,4
04	135	30,5	84	62,2	11,5	30,1
05	132	31,0	83	62,9	11,4	30,0
06	138	31,4	87	63,1	11,6	29,8
07	142	31,8	92	64,8	11,9	29,5
08	146	32,1	94	64,4	12,0	29,7
09	150	31,4	97	64,7	11,8	29,3
10	145	30,1	94	64,8	11,7	29,0
11	150	29,4	97	65,0	11,8	28,8
12	158	29,1	104	65,8	11,9	28,5

Продолжение таблицы Б.5

Месяц	Вход, уголь Количество	Зольность (вход)	Концентрат Выпуск	Извлечение	Зольность концентрация	Отвалы Количество
2024-01	160	29,4	105	65,7	11,8	28,6
02	150	29,1	97	64,7	11,7	28,9
03	140	28,7	90	64,3	11,6	29,3
04	135	30,2	83	61,5	11,4	30,2
05	132	30,7	82	62,1	11,3	30,1
06	138	31,0	86	62,5	11,5	29,7
07	142	31,6	90	63,2	11,8	29,4
08	146	32,0	93	63,7	12,0	29,6
09	150	31,1	96	64,0	11,8	29,1
10	145	30,0	93	64,1	11,7	28,9
11	150	29,3	97	64,5	11,8	28,6
12	158	28,9	103	65,2	11,9	28,3

Таблица Б.6 — Налинхэ №2, фабрика VI — Месячные производственные показатели (составлено автором по данным компании)

Месяц	Вход, уголь Количество	Зольность (вход)	Концентрат Выпуск	Извлечение	Зольность концентрация	Отвалы Количество
2023-01	680	31,0	447	65,7	17,2	27,9
02	660	30,6	433	65,6	17,0	28,1
03	625	29,8	395	63,2	16,8	29,0
04	580	31,2	364	62,8	16,5	29,3
05	570	31,6	358	62,8	16,4	29,5
2023-06	595	32,0	377	63,4	16,6	28,9
07	620	32,8	398	64,2	16,9	29,6
08	640	33,2	414	64,7	17,1	29,8
09	650	32,2	424	65,3	16,8	28,9
10	635	31,1	411	65,1	16,5	28,5
11	660	30,4	430	65,2	16,6	28,3
12	700	29,9	463	66,1	16,7	27,7
2024-01	695	30,2	460	66,1	16,9	27,7
02	670	29,8	440	65,7	16,8	27,9
03	635	29,2	407	64,1	16,6	28,7
04	590	30,6	372	63,0	16,4	29,2
05	580	30,9	365	63,0	16,3	29,3
06	605	31,4	386	64,0	16,5	28,7
07	625	32,3	400	64,6	16,9	29,4
08	645	32,7	418	64,8	17,2	29,7
09	655	31,8	427	65,4	16,8	28,9
10	640	30,6	415	65,0	16,5	28,4
11	665	30,0	435	65,5	16,6	28,2
12	705	29,5	468	66,4	16,7	27,6

Таблица Б.7 — Налинхэ №2, фабрика VII — Месячные производственные показатели (составлено автором по данным компании)

Месяц	Вход, уголь Количество	Зольность (вход)	Концентрат Выпуск	Извлечение	Зольность концентрация	Отвалы Количество
2023-01	690	30,8	460	66,7	16,8	27,6
02	665	30,3	445	66,4	16,7	27,8
03	630	29,5	408	64,8	16,5	28,6
04	585	30,9	376	64,2	16,2	29,0
05	575	31,3	370	64,3	16,1	29,1
06	600	31,8	390	65,0	16,3	28,6
07	625	32,5	405	65,4	16,6	29,3
08	645	33,0	422	65,7	16,8	29,5
09	655	32,0	432	66,0	16,5	28,8
10	640	30,9	420	65,6	16,3	28,3
11	665	30,2	438	65,9	16,4	28,1
12	705	29,7	472	66,9	16,6	27,5
2024-01	700	30,1	468	66,9	16,7	27,6
02	675	29,7	448	66,4	16,6	27,8
03	635	29,1	412	65,0	16,4	28,5
04	595	30,5	380	63,9	16,2	29,0
05	585	30,8	374	63,9	16,1	29,1
06	610	31,3	394	64,7	16,3	28,6
07	628	32,1	410	65,2	16,7	29,2
08	648	32,5	426	65,7	16,9	29,4
09	658	31,6	436	66,2	16,5	28,8
10	643	30,5	423	65,7	16,3	28,2
11	668	29,8	441	66,1	16,4	28,0
12	708	29,3	475	67,1	16,6	27,4

Таблица Б.8 — Мудучайден, фабрика VIII — Месячные производственные показатели (составлено автором по данным компании)

Месяц	Вход, уголь Количество	Зольность (вход)	Концентрат Выпуск	Извлечение	Зольность концентрация	Отвалы Количество
2023-01	470	30,1	303	64,5	18,0	29,2
02	455	29,7	293	64,4	17,9	29,4
03	430	29,1	273	63,5	17,7	29,9
04	395	30,3	248	62,8	17,6	30,4
05	385	30,6	241	62,6	17,6	30,6
06	405	31,1	255	63,0	17,8	30,1
07	420	31,7	266	63,3	18,1	30,7
08	435	32,0	278	63,9	18,2	31,0
09	440	31,0	284	64,5	17,9	30,0
10	428	29,9	276	64,5	17,7	29,6
11	448	29,3	290	64,7	17,8	29,3
12	480	28,9	314	65,4	18,0	28,8

Продолжение таблицы Б.8

Месяц	Вход, уголь Количество	Зольность (вход)	Концентрат Выпуск	Извлечение	Зольность концентрация	Отвалы Количество
2024-01	478	29,6	312	65,3	18,0	28,9
02	460	29,2	300	65,2	17,9	29,1
03	432	28,7	279	64,6	17,7	29,5
04	398	30,0	251	63,1	17,6	30,3
05	388	30,3	244	63,0	17,6	30,5
06	408	30,9	258	63,2	17,8	30,1
07	423	31,6	268	63,4	18,1	30,6
08	438	31,9	280	63,9	18,2	30,9
09	443	30,8	286	64,5	17,9	29,9
10	430	29,8	278	64,7	17,7	29,6
11	450	29,1	292	64,9	17,8	29,3
12	482	28,8	316	65,6	18,0	28,7

Таблица Б.9 — Наньлян, фабрика IX — Месячные производственные показатели (составлено автором по данным компании)

Месяц	Вход, уголь Количество	Зольность (вход)	Концентрат Выпуск	Извлечение	Зольность концентрация	Отвалы Количество
2023-01	140	29,1	91	65,0	11,0	28,2
02	136	28,8	88	64,7	10,9	28,5
03	128	28,3	81	63,3	10,8	29,1
04	118	29,6	73	62,1	10,7	29,8
05	116	29,9	72	62,1	10,6	30,0
06	122	30,4	76	62,3	10,8	29,6
07	126	31,2	79	62,7	11,0	30,2
08	130	31,6	82	63,1	11,2	30,5
09	132	30,6	84	63,6	10,9	29,6
10	128	29,5	83	64,6	10,7	28,9
11	134	28,9	87	64,9	10,8	28,6
12	142	28,5	93	65,5	11,0	28,1
2024-01	141	29,0	92	65,2	11,1	28,1
02	137	28,7	89	64,9	11,0	28,4
03	129	28,2	82	63,6	10,8	29,0
04	119	29,5	74	62,2	10,7	29,7
05	117	29,8	73	62,4	10,6	29,9
06	123	30,3	77	62,6	10,8	29,5
07	127	31,1	80	63,0	11,0	30,1
08	131	31,5	83	63,4	11,2	30,4
09	133	30,4	85	63,9	10,9	29,5
10	129	29,4	84	65,1	10,7	28,8
11	135	28,8	88	65,2	10,8	28,6

Таблица Б.10 — Даньаньху №10, фабрика X — Месячные производственные показатели
(составлено автором по данным компании)

Месяц	Вход, уголь Количество	Зольность (вход)	Концентрат Выпуск	Извлечение	Зольность концентрация	Отвалы Количество
2023-01	340	30,6	225	66,2	10,1	28,3
02	330	30,3	217	65,8	10,0	28,6
03	300	29,7	196	65,3	9,9	29,1
04	280	30,5	176	62,9	9,8	30,2
05	270	30,9	171	63,3	9,8	30,0
06	285	31,2	182	63,9	10,0	29,6
07	295	31,6	190	64,4	10,2	29,8
08	305	31,8	198	64,9	10,3	29,9
09	315	30,9	207	65,7	10,0	29,0
10	300	30,1	197	65,7	9,9	28,7
11	320	29,6	212	66,3	9,9	28,4
12	355	29,3	237	66,8	10,0	27,9
2024-01	350	29,8	234	66,9	10,1	28,0
02	335	29,5	223	66,6	10,0	28,2
03	305	29,0	202	66,2	9,9	28,7
04	285	30,3	180	63,2	9,8	30,0
05	275	30,8	174	63,3	9,8	29,9
06	290	31,0	186	64,1	10,0	29,5
07	300	31,5	193	64,3	10,2	29,7
08	310	31,7	201	64,8	10,3	29,8
09	320	30,6	210	65,6	10,0	29,1
10	305	29,9	200	65,6	9,9	28,8
11	325	29,4	214	65,8	9,9	28,5
12	360	29,0	241	66,9	10,0	27,8

Таблица Б.11 — Даньаньху №11, фабрика XI — Месячные производственные показатели
(составлено автором по данным компании)

Месяц	Вход, уголь Количество	Зольность (вход)	Концентрат Выпуск	Извлечение	Зольность концентрация	Отвалы Количество
2023-01	360	29,7	241	66,9	16,7	27,5
02	348	29,3	232	66,7	16,6	27,8
03	330	28,8	214	64,8	16,4	28,8
04	305	29,9	195	63,9	16,3	29,3
05	300	30,1	191	63,7	16,2	29,4
06	315	30,6	203	64,4	16,4	28,9
07	325	31,4	210	64,6	16,8	29,6
08	335	31,8	219	65,4	16,9	29,8
09	340	30,7	225	66,2	16,5	28,9
10	332	29,6	218	65,7	16,3	28,5
11	346	29,0	229	66,2	16,4	28,3
12	365	28,6	246	67,4	16,6	27,6

Месяц	Вход, уголь Количество	Зольность (вход)	Концентрат Выпуск	Извлечение	Зольность концентрация	Отвалы Количество
2024-01	362	29,2	244	67,4	16,7	27,6
02	350	28,9	235	67,1	16,6	27,8
03	332	28,4	217	65,4	16,4	28,6
04	307	29,7	197	64,2	16,3	29,1
05	302	29,9	193	64,0	16,2	29,2
06	317	30,5	205	64,7	16,4	28,7
07	327	31,3	212	64,9	16,8	29,5
08	337	31,7	221	65,6	16,9	29,7
09	342	30,6	227	66,4	16,5	28,9
10	334	29,5	220	65,9	16,3	28,5
11	348	28,9	231	66,5	16,4	28,2
12	367	28,5	248	67,6	16,6	27,5

Таблица Б.12 — Вэйцзыгоу, фабрика XII — Месячные производственные показатели (составлено автором по данным компании)

Месяц	Вход, уголь Количество	Зольность (вход)	Концентрат Выпуск	Извлечение	Зольность концентрация	Отвалы Количество
2023-01	110	30,2	70	63,6	18,6	30,1
02	106	29,8	67	63,2	18,5	30,4
03	99	29,2	61	61,6	18,3	31,2
04	92	30,4	56	60,9	18,1	31,6
05	90	30,7	55	61,1	18,1	31,8
06	95	31,3	58	61,3	18,3	31,3
07	98	31,9	61	62,2	18,7	31,7
08	102	32,2	64	62,7	18,8	31,9
09	104	31,1	66	63,5	18,5	31,0
10	100	30,0	64	64,0	18,3	30,6
11	105	29,4	68	64,8	18,4	30,2
12	112	29,0	73	65,2	18,6	29,7
2024-01	111	29,6	72	65,0	18,6	29,8
02	107	29,2	69	64,5	18,5	30,1
03	100	28,7	62	62,0	18,3	31,0
04	93	30,1	57	61,3	18,1	31,5
05	91	30,4	56	61,5	18,1	31,7
06	96	31,0	59	61,5	18,3	31,2
07	99	31,7	62	62,6	18,7	31,6
08	103	32,0	65	63,1	18,8	31,8
09	105	30,9	67	63,8	18,5	30,9
10	101	29,9	65	64,4	18,3	30,5
11	106	29,3	69	65,1	18,4	30,2
12	113	28,9	74	65,5	18,6	29,6

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт внедрения



胜利油田高原石油工程技术服务有限公司
Shengli Highland Oilfield Services Co., Ltd

Tel: 0546-8376988, URL: www.highlandservices.cn,
Email: zbmjj@chinahighland.com or lpmajj@163.com
Tax Number: 370502672212639, Account: 242919277890,
Add: No. 28 Fuqian Avenue, Dongying District, Dongying City
SWIFT NO.: BKCHCNBJ500

批准:
委员会主任: 
马建军
日期: 2026年03月19日

关于博士学位论文成果应用（实施）的证明
唐丽莎

学科专业: 2.3.1 “系统分析、管理与信息处理、统计学”
攻读技术科学副博士学位

委员会成员包括:
委员会主任: 马建军
委员: 总工程师谢某华, 工程师徐瑞明
经审核, 委员会确认如下:

唐丽莎撰写的副博士学位论文《中国煤炭公司生产物流流程的系统研究方法》中的相关研究成果, 已应用于胜利高原油田服务有限公司的实际业务工作中, 用于生产—物流过程的分析与优化, 以及资源利用效率提升和产品供应组织改进等相关工作的研究与实践。

已实施的论文研究成果包括:

- 1. 中国煤炭公司生产—物流系统在不确定条件下的状态评估与发展预测方法;
- 2. 中国煤炭公司生产—物流系统运行的多准则动态模型。

上述研究成果的应用, 提高了公司管理决策的科学依据, 促进了生产—物流系统运行效率的提升, 并为资源优化配置和产品供应组织改进提供了方法支持。

委员会主任:  马建军
2026年03月19日





胜利油田高原石油工程技术服务有限公司
Shengli Highland Oilfield Services Co., Ltd

/Шэнли Хайленд Оилфилд Сервисес Компани Лимитед/
Тел.: 0546-8376988, веб-страница: www.highlandservices.cn,
Эл. почта: zbmjj@chinahighland.com или lpmajj@163.com
ИНН: 370502672212639, счет: 24919277890
Адрес: Проспект Фуцянь, 28, район Дунъин, город Дунъин
№ SWIFT: BKCHCNBJ500

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
Ма Цзяньцзюнь
Дата «19» 03 2026 г.

АКТ
о внедрении (реализации) результатов кандидатской диссертации
Тан Лиша

по научной специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика»
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе:

Председатель: Ма Цзяньцзюнь

Члены комиссии: главный инженер Се Мохуа, инженер Сюй Жуймин.

Составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Методы системного исследования производственно-логистических процессов угольной компании Китая», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в деятельности компании Шэнли Хайленд Оилфилд Сервисес Компани Лимитед при решении задач, связанных с анализом и совершенствованием производственно-логистических процессов, а также с оценкой направлений повышения эффективности использования ресурсов и организации поставок продукции.

К внедрению (реализации) приняты следующие результаты диссертационного исследования:

- 1.Метод оценки состояния и прогнозирования развития производственно-логистической системы угольной компании Китая в условиях неопределенности
- 2.Многокритериальная динамическая модель функционирования производственно-логистической системы угольной компании Китая

Использование результатов диссертационного исследования позволяет повысить обоснованность принимаемых управленческих решений, улучшить эффективность функционирования производственно-логистической системы и оптимизировать использование ресурсов при организации поставок продукции.

Председатель комиссии

/подпись/ Ма Цзяньцзюнь

Дата «19» 03 2026 г.

Печать: /Шэнли Хайленд Оилфилд Сервисес Компани Лимитед * Печать для
контрактов * 3705010015938/

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026612115

**Программа для оценки неопределённости выбросов
метана угольных шахт**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II» (RU)*

Авторы: *Первухин Дмитрий Анатольевич (RU), Тан Лиша
(RU), Григорьев Егор Витальевич (RU)*

Заявка № 2026610959

Дата поступления 22 января 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 января 2026 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов