

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*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Первухин Дмитрий Анатольевич

Официальные оппоненты:

Пятков Вячеслав Викторович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, 52 отдел военного института (научно-исследовательского), старший научный сотрудник;

Костикова Елена Валентиновна

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», кафедра математического моделирования и прикладной информатики, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **16 сентября 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.12 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 16 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВА
Наталья Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 ее 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.

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 инте-

гральный 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 рекомендации 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: XXVI Международной научно-практической конференции 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), III Международной научно-практической конференции «Международный форум молодых исследователей – 2025» (06 ноября 2025 г., г. Петрозаводск), X Международной научно-практической конференции «Инновации: от теории к практике» (30-31 октября 2025 г., г. Брест), XI Всероссийской научной конференции с международным участием «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 деятельно-

сти 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, 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 (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, определены объект и предмет, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен системный анализ угольной отрасли Китая и производственно-логистических процессов компании China Coal за 2013–2024 гг. Выявлены основные факторы параметрической вариативности процессов и обоснована постановка задачи исследования.

Во второй главе обоснованы методологические основы исследования, рассмотрены методы системного анализа, моделирования, структурно-параметрического моделирования, регрессионного анализа и прогнозирования. Исследованы источники параметрической вариативности, выполнен структурный анализ системы, предложен энтропийный подход к количественной оценке распределения отклонений параметров, проведено прогнозирование основных производственных показателей и параметризация модели.

В третьей главе разработана динамическая многокритериальная модель производственно-логистической системы China Coal с учётом параметров состояния, технологической параметризации процессов переработки и действующих ограничений. Сформирована многокритериальная постановка задачи, предусматривающая совместный учёт интегрального показателя ресурсной результативности и показателя логистической устойчивости и выполнения заказов. Обоснована стратегия решения, ориентированная на получение множества Парето-оптимальных решений.

В четвёртой главе представлены результаты вычислительного эксперимента с использованием алгоритма NSGA-II. Получено множество Парето-оптимальных решений, выполнен выбор сбалансированного режима функционирования системы, проведена проверка его реализуемости и сформулированы практические рекомендации по согласованию режимов добычи, переработки, транспортировки, складирования и отгрузки продукции.

В заключении обобщены основные результаты исследования, сформулированы выводы и рекомендации по применению разработанных подходов, моделей и практических решений, а также определены направления дальнейшего исследования производственно-логистических процессов угольных компаний.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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

В диссертации внутренняя цепь поставок корпорации China Coal рассматривается как сложная многоуровневая производственно-логистическая система, характеризующаяся существенной параметрической вариативностью; её структура представлена на рисунке 1. Показано, что наиболее существенные отклонения между плановыми и фактическими значениями параметров возникают на производственном этапе и связаны, прежде всего, с объёмами добычи, качественными характеристиками угольной продукции и объёмами реализации, что ограничивает возможности использования детерминированных плановых параметров при моделировании режимов функционирования системы.

Для количественной диагностики параметрической вариативности предложен подход, основанный на энтропийном анализе структуры распределения отклонений и статистических методах. Вероятностное описание наблюдаемых состояний производственного процесса задаётся выражением (1):

$$p(x_i) = \frac{F(x_i)}{N}, \quad (1)$$

где $p(x_i)$ — относительная вероятность реализации состояния x_i , $F(x_i)$ — частота его наблюдения, N — объём выборки.

Энтропийный показатель рассчитывается по формуле (2):

$$H = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \ln p(x_i). \quad (2)$$

Показатель H используется для количественной оценки распределения отклонений; параметрическая вариативность системы представлена через отклонения объёмов добычи, зольности продукции и объёмов реализации (таблицы 1–4).

Для формирования интервальных характеристик параметров и сценарных условий функционирования системы реализован этап прогнозирования объёмов добычи угля на основе модели ARIMA, которая в общем виде представляется выражением (3):

$$\varphi(B)(1 - B)^d y_t = \theta(B)\varepsilon_t, \quad (3)$$

где y_t — объём добычи угля в момент времени t , $\varphi(B)$ и $\theta(B)$ — полиномы авторегрессии и скользящего среднего.

Результаты прогнозирования представлены на рисунке 2. На основе энтропийной диагностики и прогнозирования сформированы интервальные характеристики ключевых параметров и набор сценарных условий функционирования системы. Установлено, что производственное звено вносит наибольший вклад в совокупную параметрическую вариативность, а переход от точечных плановых оценок к интервальному и сценарному представлению параметров обеспечивает параметризацию динамической многокритериальной модели.

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

В диссертации производственно-логистическая система China Coal рассматривается как сложная динамическая система взаимосвязанных потоков и состояний, включающая добычу, перера-

ботку, транспортировку, запасы и отгрузку продукции. Динамический характер модели определяется временной поэтапной связанностью режимов функционирования и учётом параметров состояния, прежде всего запасов; структурная схема системы представлена на рисунке 3.

На этой основе задача управления сведена к динамической многокритериальной оптимизационной постановке с двумя целевыми функциями. Критерий ресурсной результативности задаётся выражением (4):

$$MAXU = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L Q_{kl}^t P_{kl} - \sum_{i=1}^I X_i^t C_{i0} - \sum_{j=1}^J Y_j^t C_{j1} - \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I X_{ij}^t S_{ij} - \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L C_{l2} \frac{R_{jl}^t + R_{jl}^{t-1}}{2} - \sum_{i=1}^I C_{02} \frac{V_i^t + V_i^{t-1}}{2} \right], \quad (4)$$

а критерий логистической устойчивости и выполнения заказов — выражением (5):

$$MAX\mu = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \theta_k \left[\gamma_{k1} \sum_{l=0}^L \rho_{kl} \frac{Q_{kl}^t}{E_{kl}^t} + \gamma_{k2} \sum_{l=0}^L \rho_{kl} \left(1 - \frac{AH_{kl}^t - F_{kl}}{F_{kl}} \right) \right]. \quad (5)$$

Система ограничений модели задаётся выражением (6), где U — интегральный показатель ресурсной результативности, μ — показатель логистической устойчивости и выполнения заказов, i, j, k, l, t — индексы соответственно шахт, обогатительных фабрик, клиентов, видов угля и периодов планирования; при этом $l = 0$ соответствует исходному углю. A_i, B_j — мощности шахт и обогатительных фабрик; V_i', R_{jl}' — ёмкости складов исходного и товарного угля; V_i^0, R_{jl}^0 — начальные запасы; α — общая транспортная мощность цепочки. E_{kl}^t — спрос клиента на уголь; p_{kl}^t — цена покупки; F_{kl} — требуемый стандарт зольности; $\theta_k, \gamma_{k1}, \gamma_{k2}, \rho_{kl}$ — весовые коэффициенты клиента, количества, качества и вида угля. $XH_i, H_{jl}, YH_j, AH_{kl}^t, AH_{k0}^t$ — показатели качества

угля, характеризующие зольность исходного сырья, товарной продукции, угля, поступающего на переработку, и угля, поставляемого потребителям. $S_{ij}, C_{i0}, C_{j1}, C_{l2}, C_{02}$ — затраты на транспортировку, добычу, переработку и хранение. $X_i^t, X_{ij}^t, Y_j^t, L_{jl}^t, Q_{kl}^t, Q_{k0}^t, Z_{jkl}^t, Z_{ik0}^t, V_i^t, R_{jl}^t, D_{kl}^t$ — соответственно объёмы добычи, транспортировки, переработки, выпуска товарного угля, поставок, реализации, запасов и степень выполнения заказа:

$$\begin{cases}
 X_i^t \leq A_i, Y_j^t \leq B_j, R_{jl}^t \leq R'_{jl}, V_i^t \leq V'_i, \\
 \mathbf{L}_{jl}^t = \mathbf{f}(\mathbf{Y}_j^t, \mathbf{YH}_j^t, \dots), \\
 Y_j^t = \sum_{i=1}^I X_{ij}^t, j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T, \\
 X_i^t + V_i^{t-1} = \sum_{j=1}^J X_{ij}^t + \sum_{k=1}^K Z_{ik0}^t + V_i^t, i = 1, \dots, I, t = 1, \dots, T, \\
 Q_{kl}^t = \sum_{j=1}^J Z_{jkl}^t, k = 1, \dots, K, l = 1, \dots, L, t = 1, \dots, T, \\
 \text{s.t. } Q_{k0}^t = \sum_{i=1}^I Z_{ik0}^t, k = 1, \dots, K, t = 1, \dots, T, \\
 \sum_{k=1}^K Z_{jkl}^t + R_{jl}^t = L_{jl}^t + R_{jl}^{t-1}, j = 1, \dots, J, l = 1, \dots, L, t = 1, \dots, T, \\
 YH_j^t = \frac{\sum_{i=1}^I X_{ij}^t XH_i}{\sum_{i=1}^I X_{ij}^t}, j = 1, \dots, J, t = 1, \dots, T, \\
 AH_{kl}^t = \frac{\sum_{j=1}^J Z_{jkl}^t H_{jl}}{\sum_{j=1}^J Z_{jkl}^t}, k = 1, \dots, K, l = 1, \dots, L, t = 1, \dots, T, \\
 AH_{k0}^t = \frac{\sum_{i=1}^I Z_{ik0}^t XH_i}{\sum_{i=1}^I Z_{ik0}^t}, k = 1, \dots, K, t = 1, \dots, T, \\
 X_i^t, X_{ij}^t, Y_j^t, L_{jl}^t, Z_{jkl}^t, Z_{ik0}^t, Q_{kl}^t, V_i^t, R_{jl}^t \geq 0.
 \end{cases} \quad (6)$$

Вычислительная реализация модели выполнена в среде MATLAB с использованием алгоритма NSGA-II (функция gamultiobj). В результате получено множество Парето-оптимальных

решений по двум компонентам векторной цели; на первой границе Парето выделены 12 альтернатив, образующих множество допустимых компромиссных решений между ресурсной результативностью системы и устойчивостью выполнения объёмно-качественных требований потребителей. Графическая интерпретация полученного множества решений представлена на рисунке 4.

Для выделения одного содержательно интерпретируемого режима из множества Парето-оптимальных решений используется критерий минимального нормированного расстояния до идеальной точки. Нормирование критериев выполняется по формулам (7) и (8):

$$U_i = \frac{U_i - U_{min}}{U_{max} - U_{min}}, \quad (7)$$

$$\mu_i = \frac{\mu_i - \mu_{min}}{\mu_{max} - \mu_{min}}, \quad (8)$$

где U_i и μ_i — значения соответствующих критериев для i -го Парето-оптимального решения; U_{min} , U_{max} и μ_{min} , μ_{max} — минимальные и максимальные значения критериев на Парето-множестве.

Евклидово расстояние до идеальной точки (1,1) определяется выражением (9):

$$d_i = \sqrt{(1 - U_i)^2 + (1 - \mu_i)^2}, \quad (9)$$

Опорным принимается решение, для которого d_i минимально. Данная процедура используется после построения Парето-множества и позволяет выбрать сбалансированный режим без предварительного сведения многокритериальной задачи к одному критерию.

На основе выбранного режима выполнена детализация решений в форме согласованного производственно-логистического плана, включающего поквартальные объёмы добычи по шахтам, переработки и выпуска по обогатительным фабрикам, а также поставок потребителям по направлениям спроса (таблицы 5–9). Сопоставление первоначального производственно-логистического плана China Coal и выбранного сбалансированного режима показывает, что переход к Парето-стратегии сопровождается ростом объёмов добычи и переработки, снижением суммарных запасов угля, повышением среднего коэффициента использования мощностей, а

также более полным выполнением объёмно-качественных требований потребителей.

В агрегированном выражении выбранный режим соответствует уровню $U = 28,3$ млрд юаней и уровню $\mu = 0,835$. Это означает повышение показателя ресурсной результативности на 7–9 % и показателя логистической устойчивости и выполнения заказов на 4–6 % по отношению к первоначальному производственно-логистическому плану компании.

Таким образом, предложенная многокритериальная модель и процедура выбора опорного решения обеспечивают переход от формализованного описания системы к содержательно интерпретируемому и практически реализуемому производственно-логистическому плану, ориентированному на более согласованное функционирование взаимосвязанных подсистем и более полное выполнение требований потребителей.

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 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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.

2. 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.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. **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. – pp. 144–163. DOI: 10.5281/zenodo.15093139.

4. 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, No.7. – P. 1716–1729. DOI: 10.5829/ije.2026.39.07a.15

Патенты/свидетельство на объекты интеллектуальной собственности:

5. 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.

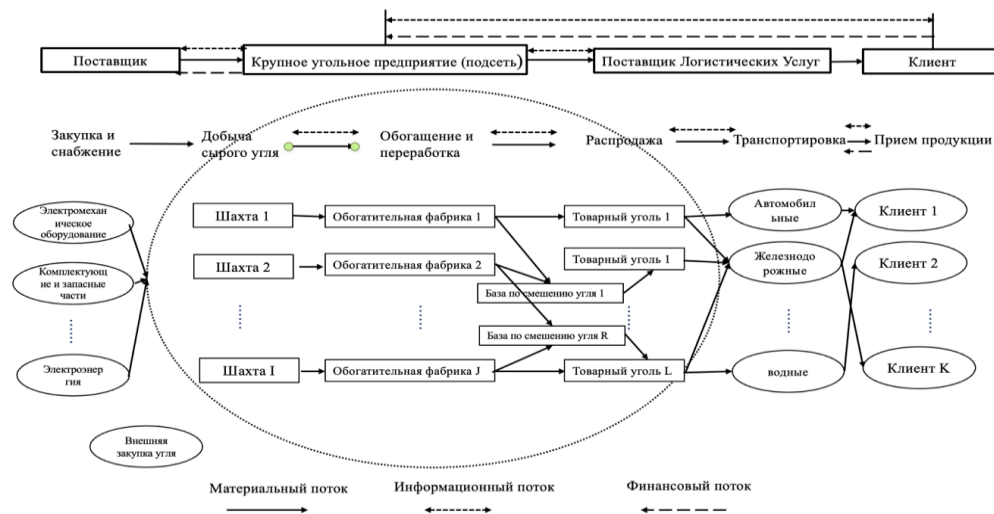


Рисунок 1 — Топологическая модель производственно-логистической системы угольной компании



Рисунок 2 — Добыча угля: исторические данные и сценарный прогноз

Таблица 1 — Распределение состояний по отклонениям добычи и энтропия

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	—	—
$x_2(+10 \sim +8)$	0	0	—	—
$x_3(+7 \sim +9)$	1	0.1	-3.32193	-0.33219
$x_4(+4 \sim +6)$	3	0.3	-1.73697	-0.52109
$x_5(+1 \sim +3)$	4	0.4	-1.32193	-0.52877
$x_6(-3 \sim -1)$	2	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 2 — Распределение состояний по отклонениям зольности и энтропия

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)	1	0.1	—	—
$x_2(+10 \sim +8)$	0	0	—	—
$x_3(+7 \sim +9)$	0	0	—	—
$x_4(+4 \sim +6)$	0	0	—	—
$x_5(+1 \sim +3)$	0	0	—	—
$x_6(-3 \sim -1)$	8	0.8	-0.32193	-0.25754
$x_7(-6 \sim -4)$	1	0.1	-3.32193	-0.33219
$x_8(-9 \sim -7)$	0	0	—	—
$x_9(-\infty \sim -10)$	0	0	—	—
Общая энтропия $H(x)$ ($d_{ei}S$)	0.5897			

Таблица 3 — Распределение состояний по отклонениям продаж и энтропия

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	—	—
$x_2(+10 \sim +8)$	2	0.2	-2.32193	-0.46439
$x_3(+7 \sim +9)$	2	0.2	-2.32193	-0.46439
$x_4(+4 \sim +6)$	1	0.1	-3.32193	-0.33219
$x_5(+1 \sim +3)$	2	0.2	-2.32193	-0.46439
$x_6(-3 \sim -1)$	2	0.2	-2.32193	-0.46439
$x_7(-6 \sim -4)$	1	0.1	-3.32193	-0.33219
$x_8(-9 \sim -7)$	0	0	—	—
$x_9(-\infty \sim -10)$	0	0	—	—
Общая энтропия $H(x)$ ($d_{ei}S$)	2.5219			

Таблица 4 — Сопоставление агрегированного энтропийного показателя

Тип неопределённости	Внутренняя цепочка поставок 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

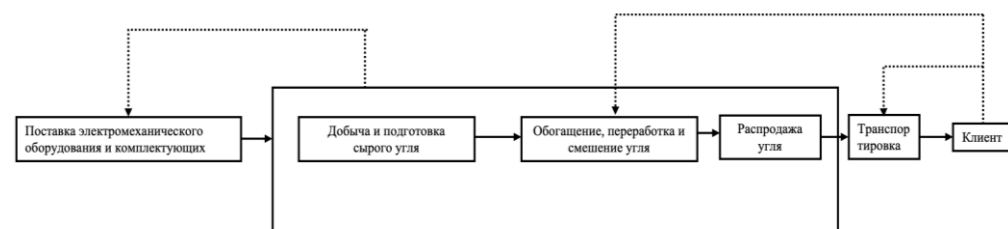


Рисунок 3 — Агрегированная линейная модель производственно-логистической системы

Таблица 5 — Объёмы добычи угля X_i^t по шахтам China Coal (тыс. т в квартал)

Шахта i	Q1	Q2	Q3	Q4
Антайбао	1400	1380	1350	1440
Ванцзялин	330	333	300	310
Яоцяо	120	115	110	110
Сюйчжуан	120	104	100	110
Налинхэ № 2	2400	2300	2200	2310
Мудучайден	850	805	800	880
Наньян	100	92	90	100
Илань № 3	100	103	100	120
Даньяньху № 10	450	437	420	460
Вэйцзыгоу	120	115	110	120
Итого	59900 тыс. т	57854 тыс. т	55800 тыс. т	59600 тыс. т

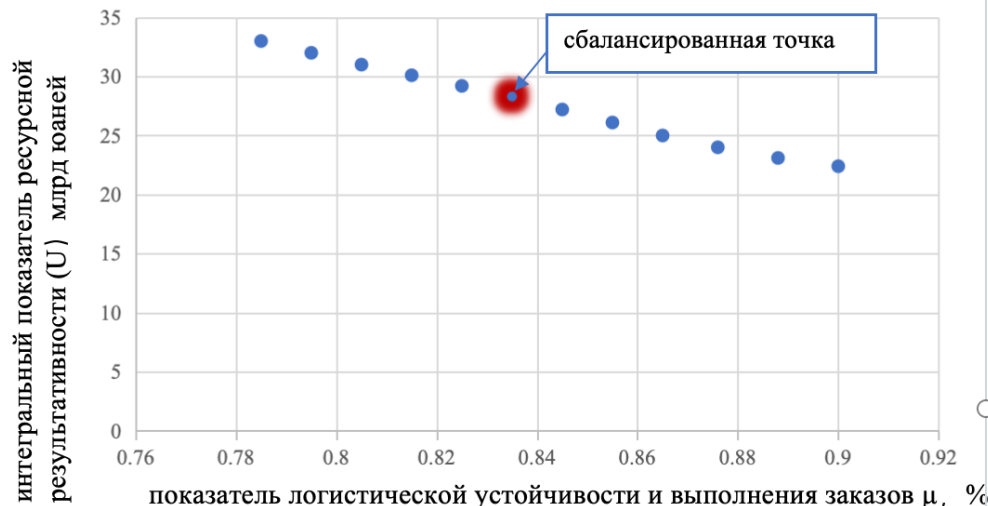


Рисунок 4 — Парето-фронт оптимизационной задачи China Coal Energy (NSGA-II)

Таблица 6 — Переработка и выпуск по фабрикам ($t=1$, I квартал; тыс. т/квартал)

j	Фабрика	Y_j^1	L_{j1}^1	L_{j2}^1	L_{j3}^1
1	Антайбао (I)	820	410	240	150
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	Наньян (IX)	150	75	0	55
10	Даньяньху (X)	400	0	250	130
11	Даньяньху (XI)	360	0	230	110
12	Вэйцзыгоу (XII)	170	0	105	57
Итого	—	5116	1005	2437	1441

Таблица 7 — Переработка и выпуск по фабрикам (t=2, II квартал; тыс. т/квартал)

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	Наньян (IX)	145	72	0	53
10	Даньяньху (X)	390	0	245	125
11	Даньяньху (XI)	350	0	222	108
12	Вэйцзыгоу (XII)	175	0	108	58
Итого	—	5208	1021	2478	1474

Таблица 8 — Переработка и выпуск по фабрикам (t=3, III квартал; тыс. т/квартал)

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	Наньян (IX)	140	70	0	50
10	Даньяньху (X)	380	0	238	122
11	Даньяньху (XI)	340	0	215	105
12	Вэйцзыгоу (XII)	170	0	105	57
Итого	—	5116	1005	2437	1441

Таблица 9 — Переработка и выпуск по фабрикам (t=4, IV квартал; тыс. т/квартал)

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

Таблица 10 — Основные параметры и переменные внутренней снабженческой цепочки угольной компании

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
XH_i (%)	Зольность исходного угля шахты i	γ_{k1}, γ_{k2}	Весовые коэффициенты 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
YH_j (%)	Зольность исходного угля, поступающего на фабрику j	AH_{kl}^t (%)	Фактическая зольность угля l , поставляемого клиенту k в период t
A (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

Обозначение	Описание	Обозначение	Описание
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_{jl} (юань/т)	удельные затраты на переработку 1 тонны рядового угля на обогатительной фабрике j	R_{jl}^t (млн т)	Запасы угля l на фабрике j 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
V_i^0 (млн т)	Начальные запасы исходного угля на шахте i	Z_{jko}^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}^t (млн т)	Максимальная ёмкость склада товарного угля l на фабрике j	-	-