

*На правах рукописи*

Роголин Родион Сергеевич

**РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТОВ ФОРМИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВЫХ  
ЦЕПОЧЕК ПОСТАВКИ СЫРЬЯ И ПЛАНА ВЫПУСКА ГОТОВОЙ  
ПРОДУКЦИИ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ  
С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ**

Специальность

08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук

Владивосток – 2022

Работа выполнена на кафедре математики и моделирования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса».

**Научный руководитель:** Мазелис Лев Соломонович, доктор экономических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса» (ФГБОУ ВО «ВГУЭС»), г. Владивосток.

**Официальные оппоненты:** Барыкин Сергей Евгеньевич, доктор экономических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», профессор высшей школы сервиса и торговли, г. Санкт-Петербург.

Гусев Денис Александрович, кандидат экономических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»» (НИУ ВШЭ), доцент департамента операционного менеджмента и логистики, г. Москва.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск.

Защита состоится 21 сентября 2022 года в 11.00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.202.02 на базе ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» и ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса» по адресу: г. Владивосток, ул. Гоголя, 41, кампус ВГУЭС, ауд. 1501.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ДВФУ и на сайте ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»: [https://www.dvfu.ru/science/dissertation-tips/analytical-platform-of-dissertations/detail.php?ID=65507910&IBLOCK\\_ID=1156](https://www.dvfu.ru/science/dissertation-tips/analytical-platform-of-dissertations/detail.php?ID=65507910&IBLOCK_ID=1156)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
канд. экон. наук

Е. В. Кочева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В современных условиях большинство предприятий различных отраслей не могут конкурировать исключительно как отдельные объекты в меняющейся маркетинговой среде. Управление цепочками поставок (SCM) представляет собой интегрированный подход к моделированию, прогнозированию и планированию потоков информации и физических ценностей между поставщиками, дистрибьюторами, провайдерами, предприятиями-производителями и конечными потребителями. Интегрированное управление цепочками поставок признано в качестве одной из основных возможностей создания промышленным предприятием конкурентных преимуществ. Основная цель SCM состоит в том, чтобы на основе оптимизации цепи создания стоимости получить экономический эффект от снижения издержек и максимального удовлетворения спроса на конечную продукцию.

Управление предприятием лесопромышленной отрасли в целом и его подсистемами является сложным процессом. Сложность заключается в большом объеме данных, которыми необходимо оперировать, в значительном числе рисков и неопределенностей внешней среды, влияющих на конечное решение любой задачи лесопромышленного предприятия, в том числе по формированию устойчивых цепочек поставок сырья и ценовой политики. Для принятия эффективных решений на горизонте планирования топ-менеджменту предприятия необходимы инструменты, позволяющие с учётом стохастичности внешней и внутренней среды находить на всём множестве допустимых решений лучшие.

Таким образом, разработка экономико-математических методов и моделей формирования устойчивых цепочек поставок сырья и готовой продукции, а также ценовой политики предприятия с учетом множества особенностей лесопромышленной отрасли, неопределенностей и рисков является актуальной темой исследования, имеющей важное практическое значение.

**Степень изученности и разработанности проблемы.** Исследования развития лесного комплекса и лесопромышленной отрасли базируются на современных подходах, существенный вклад в разработку которых внесли отечественные ученые Т. Л. Безрукова, А. О. Боровлев, И. А. Высоцкая, В. В. Денисенко, В. А. Зеликов, Д. М. Левушкин, М. В. Мацнев, В. В. Никитин, А. В. Скрыпников, Е. В. Чирков.

Проблемам моделирования процессов поставок сырья, логистики готовой продукции, планирования выпуска и формирования ценовой политики предприятий посвящено большое количество публикаций. Значительный вклад в решение проблем управления этими процессами внесли отечественные и зарубежные ученые Т. Апалькова, М. А. Бендилов, Д. А. Гусев, О. А. Катюхина, А. В. Мищенко, В. В. Солодовников, П. Галетси, К. Грцибовска, К. Катцилиаки, С. Кумар, Ф. Лонго, А. С. Лионс, М. Рамирез-Гранадос, Дж. Е. Хернандез, П. Хоффа-Дабровска и др. В исследованиях П. Т. Воронкова, Г. Гейера, Е. В. Катковой, М. М. Орлова, В. Н. Петрова, П. Х. Пирса, С. В. Починкова, И. Г. Русовой, А. Г. Третьякова и др. приведены модели, посвященные вопросам ценообразования в лесном комплексе.

Основные аспекты математического аппарата теории и методов оптимизации в экономике рассмотрены в работах отечественных и зарубежных ученых Б. Баранкина, М. К. Гавурина, Л. В. Канторовича, В. С. Немчинова, В. В. Новожилова, Е. А. Нурминского, Е. М. Биля, Ф. Вулфа, С. И. Гасса, Р. Дорфмана, Г. Куна, Г. Марковица, А. Таккера, М. Франка, Ф. Л. Хитчкока, А. Чарнеса и др. Методам нахождения решений задач нелинейного стохастического программирования (НСП) посвящены

исследования Ю. С. Кана, О. Н. Канаевой, А. И. Кибзуна, А. А. Лебедева, В. В. Малышева, Дж. Р. Бирге, Р. Дж.-Б. Ветса, Р. Кеннеди, М. Оцтурка и др. Отсутствие единого подхода к решению задач НСП означает, что для многих задач НСП необходимо разрабатывать свои алгоритмы нахождения оптимальных и субоптимальных решений.

Многочисленным публикациям исследователей присущ большой диапазон мнений, а существующие инструментальные средства при моделировании не учитывают в полной мере влияние неопределённостей и рисков на важные стороны процессов функционирования лесопромышленных предприятий. Таким образом, существует потребность в разработке моделей, позволяющих решать задачу формирования устойчивых цепочек поставок сырья при взаимодействии с товарно-сырьевой биржей с учетом неопределенности потока предложений; устанавливать цены на конечные товары с учетом неопределенности спроса и комплексного рассмотрения трех наиболее важных подпроцессов лесопромышленного предприятия, разработать алгоритмы нелинейной стохастической оптимизации.

**Цель и задачи.** Цель диссертационного исследования заключается в моделировании процессов формирования устойчивой цепочки поставки сырья и плана выпуска готовой продукции лесопромышленными предприятиями с учетом неопределенностей и рисков внешней среды.

Поставленная цель обусловила необходимость решения следующих *задач*:

- исследовать теоретические основы экономико-математического моделирования производственных процессов предприятий лесопромышленной отрасли;
- исследовать методические подходы к моделированию устойчивых цепочек поставок с учётом неопределённостей внешней и внутренней среды;
- разработать оптимизационную модель формирования устойчивых цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи с учетом неопределенностей потока предложений и динамического изменения качества закупленного сырья;
- разработать метод нахождения решения модели формирования устойчивой цепочки поставок сырья с товарно-сырьевой биржи, представляющей собой задачу нелинейного стохастического программирования;
- разработать модель формирования ценовой политики предприятия на горизонте планирования с учетом формирования цепочек поставок сырья с регионального рынка, неопределённости рыночного спроса на готовую продукцию, технологичности производственного процесса, логистики поставки товаров собственного изготовления на рынок.

**Объект исследования.** Объект исследования – лесопромышленное предприятие лесной отрасли России.

**Предмет исследования.** Предмет исследования – инструментальные средства формирования цепочек поставок сырья и ценовой политики лесопромышленного предприятия.

**Соответствие области диссертационного исследования паспорту научной специальности.** Область диссертационного исследования соответствует п. 1.4 «Разработка и исследование моделей и математических методов анализа микроэкономических процессов и систем: отраслей народного хозяйства, фирм и предприятий, домашних хозяйств, рынков, механизмов формирования спроса и потребления, способов количественной оценки предпринимательских рисков и обоснования инвестиционных решений» и 2.3 «Разработка систем поддержки принятия решений для рационализации организационных структур и оптимизации управления экономикой на всех уровнях» паспорта специальностей ВАК 08.00.13

«Математические и инструментальные методы экономики».

**Теоретическими и методическими основами исследования** являются фундаментальные и прикладные исследования российских и зарубежных ученых, посвященные теоретическим и методическим аспектам теории оптимизации, в том числе моделям формирования устойчивых цепочек поставок сырья. В диссертации используются следующие общенаучные методы: системный анализ и математическое, эконометрическое, экономико-математическое и компьютерное моделирования.

В процессе исследования применялись экономико-математические методы. Обработка данных проводилась с использованием прикладной программы «Microsoft Excel» и языков программирования «Python» и «Matlab».

**Информационная база исследования** сформирована на основе официальных данных АО СПбМТСБ «Санкт-Петербургская международная товарно-сырьевая биржа», законодательных и нормативных актов России, данных экспертных оценок, работ отечественных и мировых ученых, материалов глобальной сети Интернет, годовых отчетов лесоперерабатывающих предприятий, а также материалов собственных исследований.

**Научная новизна диссертационного исследования** представлена разработкой экономико-математического инструментария для формирования устойчивой цепочки поставки сырья и плана выпуска готовой продукции лесопромышленными предприятиями с учетом неопределенностей и рисков внешней среды.

К основным результатам, составляющим научную новизну исследования, относятся:

1. Разработана динамическая оптимизационная модель формирования устойчивых цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи, представляющая собой задачу стохастического нелинейного программирования, целевой функцией которой являются затраты на приобретение сырья. Модель позволяет на заданном горизонте планирования формировать план закупок сырья и отличается возможностью учитывать риск отказа от заключённого договора в связи с потерей качества сырья во время доставки и невыполнением сроков доставки, а также возможностью приобретать сырьё на лесной секции биржи с учётом неопределённостей по количеству суточных предложений, их объёмам и ценам (С. 51-60).

2. Разработан метод нахождения решения частной задачи нелинейного стохастического программирования, моделирующей процесс формирования устойчивых цепочек поставок сырья с биржи. Метод позволяет за приемлемое вычислительное время находить решение модели, близкое к субоптимальному, и представляет собой эвристический алгоритм, использующий на отдельных шагах метод ветвей и границ и генетический алгоритм (С. 60-72).

3. Разработана модель, позволяющая формировать субоптимальную ценовую политику предприятия на горизонте планирования с учетом подпроцесса закупки сырья на региональных рынках, неопределённости рыночного спроса на готовую продукцию, технологичности производственного процесса, логистики поставки готовой продукции на рынок (С. 91-102).

**Теоретическая и практическая значимость.** Результаты диссертационного исследования развивают теоретические и методологические аспекты теории и методов оптимизации, теорию принятия решений на микроуровне. Формирование устойчивых цепочек поставок сырья можно использовать при разработке плана по открытию предприятия для расчета рентабельности бизнеса и как самостоятельную единицу,

позволяющую снабжать уже созданное предприятие по переработке лесного сырья.

Теоретическая значимость заключается в разработке научно обоснованного подхода к формированию цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи и субоптимальной ценовой политики предприятия с учетом неопределенностей внешней среды. Подход основывается на теории и методах принятия решений и оптимизации, что повышает эффективность и устойчивость функционирования как организации, так и всей отрасли.

Основные выводы и положения диссертации могут быть использованы предприятиями по разработке нормативно-правовых обеспечений, стратегий, программ и непрограммных мероприятий в рамках методического обеспечения управления лесопромышленной отраслью и ее развития. Результаты исследования можно внедрять в учебный процесс при подготовке специалистов по направлениям «Экономика», «Прикладная математика», «Прикладная математика и информатика», «Прикладная информатика».

**Достоверность и обоснованность** результатов исследования обеспечивается использованием современных методов и инструментов научных исследований, принципов и методов системного подхода. Для подтверждения работоспособности разработанной методики и методических положений проведены их апробации на реальных данных лесной промышленности Приморского края.

Разработанные положения, выводы и рекомендации репрезентативны, так как базируются на большом статистическом материале и его корректной экономико-математической обработке.

**Апробация результатов исследования.** Основные положения работы доложены и обсуждены на отечественных и международных конференциях: Региональная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных по естественным наукам секция «Математическое моделирование» (Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 2021), конференция «Ломоносов 2021», секция «Управление бизнесом в цифровой экономике» (Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, 2021), XXII Всероссийский симпозиум «Стратегическое планирование и развитие предприятий», секция «Модели и методы разработки стратегии предприятия» (Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, 2021), XXIII международная научно-практическая конференция-конкурс студентов, аспирантов и молодых учёных «Интеллектуальный потенциал вузов – на развитие Дальневосточного региона России и стран АТР» (Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Владивосток, 2021).

**Публикации.** По результатам исследования опубликовано 7 научных статей, 3 из которых опубликованы в журналах, входящие в международные реферативные базы Scopus и Web of Science, 1 статья – в рецензируемом издании из перечня ВАК. Зарегистрированы 2 программы для ЭВМ. Общий объем статей в журналах из перечня ВАК составил 5,97 п.л., в том числе личный вклад соискателя – 5,14 п.л.

**Структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 180 источника. Общий объем работы – 148 страниц машинописного текста, включая 9 таблиц, 54 рисунка, 85 формул.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, определены объект и предмет исследования, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе «Теоретические основы моделирования производственных

процессов на предприятиях лесопромышленной отрасли» проведен анализ функционирования предприятий лесопромышленной отрасли, в результате которого были отмечены проблемы экономически целесообразного обеспечения технологического процесса сырьём нужного качества в требуемых объемах и выбора ценовой политики предприятия. На основе анализа инструментальных средств моделирования устойчивых цепочек поставок сырья отмечены их недостатки и обоснована необходимость разработки новых моделей и алгоритмов их решения, позволяющих находить субоптимальный план закупки сырья с товарно-сырьевой биржи с учётом неопределённостей. Проведённый анализ методов поиска оптимального решения задач нелинейного стохастического программирования показал отсутствие универсальных алгоритмов для такого класса задач, что обуславливает необходимость разработки алгоритмов поиска эффективного решения задач управления цепочками поставок, устойчивых с точки зрения неопределённости входных параметров и приемлемых по количеству переменных и времени работы.

Во второй главе «Моделирование цепочек поставок сырья с биржи на предприятия лесопромышленной отрасли и разработка алгоритма поиска субоптимального решения» предложен метод формирования устойчивых цепочек поставок сырья с учётом неопределённостей внешней среды, в основе которого лежит нелинейная стохастическая модель закупки сырья на товарно-сырьевой бирже, позволяющая сформировать субоптимальный план обеспечения предприятия сырьём на среднесрочном периоде и хеджировать риски, связанные со стохастичностью потока предложений на бирже и логистики доставки. Для нахождения решения модели разработан двухэтапный алгоритм, объединяющий метод ветвей и границ и генетический алгоритм. Модель и алгоритм апробированы на данных предприятия Приморского края и крупнейшей товарно-сырьевой биржи России. Проведен анализ чувствительности модели к основным входным параметрам.

В третьей главе «Модель формирования ценовой политики лесопромышленного предприятия с учётом неопределённостей закупки сырья на региональных рынках, рыночного спроса на готовую продукцию и логистики поставки товаров на рынок» разработана оптимизационная модель формирования цен на производимые товары в рамках рассмотрения вопросов об объемах производства с учетом неопределённости спроса на товары, способе и методе транспортировки конечного вида продукции до заказчика и обеспечении технологического процесса сырьём требуемого объема и качества. Предложена двухэтапная итерационная схема поиска субоптимального вектора цен на реализуемые предприятием товары: на первом этапе методом ветвей и границ находится оптимальный план производства и логистики, а на втором – с использованием градиентного спуска и штрафных функций определяется вектор цен, максимизирующий доналоговую прибыль.

В заключении изложены основные выводы по результатам исследования.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

**1. Разработана динамическая оптимизационная модель формирования устойчивых цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи, представляющая собой задачу стохастического нелинейного программирования, целевой функцией которой являются затраты на приобретение сырья. Модель позволяет на заданном горизонте планирования формировать план закупок**

**сырья и отличается возможностью учитывать риск отказа от заключённого договора в связи с потерей качества сырья во время доставки и невыполнением сроков доставки, а также возможностью приобретать сырьё на лесной секции биржи с учётом неопределённостей по количеству суточных предложений, их объёмам и ценам (С. 51-60).**

Интегрированное управление цепочками поставок (SCM) признано в качестве одной из основных возможностей создания промышленным предприятием конкурентных преимуществ. SCM – интегрированный подход к моделированию, прогнозированию и планированию потоков информации и физических ценностей между поставщиками, дистрибьюторами, провайдерами, предприятиями-производителями и конечными потребителями. Основная цель SCM состоит в том, чтобы на основе оптимизации цепи создания стоимости получить экономический эффект от снижения издержек и максимального удовлетворения спроса на конечную продукцию.

Рассматривается задача формирования устойчивых цепочек поставок сырья на лесопромышленное предприятие, не имеющее в своей структуре лесодобывающих подразделений и лесных ресурсов. Предприятие закупает необходимое для производства сырьё на конкурентном рынке через товарно-сырьевую биржу. Поток предложений на бирже существенно неопределён как по количеству предложений от лесодобывающих предприятий различных регионов, так и по объёмам и стоимостям предложений. Для учёта неопределённостей и связанных с ними рисков возможной необеспеченности сырьём технологического процесса в отдельные промежутки времени будем использовать вероятностный подход при моделировании процесса поставок.

Будем рассматривать лесопромышленное предприятие, на котором технологический процесс ежедневно требует определённое количество сырья. Технология производства готовой продукции позволяет использовать любой вид сырья из двух (пиловочник или баланс), а также смешивать их в любой пропорции. На заданном горизонте планирования  $M$  необходимо обеспечивать такой запас сырья, который гарантировал бы безостановочную работу и минимизировал расходы на его покупку. Кроме того, сырьё должно обладать достаточным уровнем качества, которое способно ввиду разных причин значительно ухудшаться.

Рассмотрим предприятие, которому для производства необходимо сырьё двух видов, поставляемое с товарно-сырьевой биржи. Заявки по продаже определённых лотов поступают из нескольких регионов РФ, каждая заявка задаётся двумя параметрами: объёмом и стоимостью с учётом доставки до потребителя. Особенность работы биржи заключается в том, что лот купить можно только целиком. Таким образом, будем считать, что имеется поток заявок, каждая из которых задаётся вектором  $(m, r, i(m, r), v_i, c_i)$ , где  $m$  – порядковый номер дня на заданном горизонте планирования,  $m = 1, \dots, M$ ;  $r$  – номер региона, из которого поступила заявка  $r = 1, \dots, R$ ;  $i = i(m, r)$  – номер заявки в зависимости от дня  $m$  и региона  $r$ ,  $i = 0, \dots, I$ ;  $I = I(m, r)$  – количество заявок на всем горизонте планирования в зависимости от номера региона  $r$  и дня  $m$ ;  $v_i$  – объём сырья в  $i$ -й заявке ( $m^3$ );  $c_i$  – цена покупки  $i$ -й заявки (руб.), включая стоимость доставки. Количество и распределение во времени выставленных на продажу лотов  $I(r, m)$ , их объёмы  $v_i$  и стоимости  $c_i$  являются случайными величинами.



При рассмотрении процесса доставки сырья до склада предприятия особо выделяют время доставки и качество поставленного сырья. Качество сырья ухудшается быстрее в теплое время года при существенном увеличении времени транспортировки. В связи с этим предприятие-потребитель имеет возможность расторгнуть договор ввиду: 1) неисполнения срока поставки, 2) несоответствия качества поставленного сырья параметрам, зафиксированным в договоре. В модели мы будем считать, что для каждого лота пройденное за сутки по железной дороге расстояние является случайной величиной, заданной по некоторому закону распределения. Введём функцию  $f(t)$ , задающую вероятность расторжения контракта в момент времени  $t$  по указанным выше двум причинам.

Наряду с промежутком планирования закупок  $[0, M]$  необходимо рассматривать некоторый временной отрезок до момента времени  $t = 0$ , так как по контрактам, заключенным на этом отрезке времени, товар на склад поступит в дни из горизонта планирования. Промежуток  $[M + 1, M + \underline{M}]$  содержит дни, в которые поступит сырьё по контрактам, заключённым в конце интервала планирования.

Для построения модели введем следующие переменные и обозначения:  $R$  – количество регионов, откуда поступают заявки на продажу;  $M$  – длина горизонта планирования, дни;  $(m, r, i(m, r), v_i, c_i)$  – поток заявок ( $i = 1, \dots, I(m, r)$ ) в день  $m = 1, \dots, M$ , следующих из региона  $r = 1, \dots, R$  с объемами и издержками  $v_i, c_i$  соответственно;  $r$  – номер региона, из которого поступила заявка  $r = 1, \dots, R$ ;  $i = i(m, r)$  – номер заявки в зависимости от дня  $m$  и региона  $r$ ,  $i = 0, \dots, I$ ;  $I = I(m, r)$  – количество заявок на всем горизонте планирования в зависимости от номера региона  $r$  и дня  $m$ ;  $v_i$  – объем сырья в  $i$ -й заявке ( $\text{м}^3$ );  $c_i$  – цена покупки  $i$ -й заявки (руб.), включая стоимость доставки;  $u_m$  – количество сырья на складе в день  $m$  ( $\text{м}^3$ );  $\tilde{u}_m$  – необходимый для производства объем сырья в день  $m$  ( $\text{м}^3$ );  $\bar{u}$  – максимальная вместимость склада ( $\text{м}^3$ );  $\underline{u}$  – неприкосновенный запас сырья на складе ( $\text{м}^3$ );  $J$  – количество заявок, которые были куплены в предыдущий период (до  $m = 1$ );  $v_j$  – объем сырья в заявке  $j = 1, \dots, J$ , закупленный в предыдущем периоде ( $\text{м}^3$ );  $L_r$  – расстояние от поставщиков из региона  $r$  до склада предприятия по ж/д (км);  $T_i$  – срок доставки сырья по  $i$ -й заявке, зафиксированный в договоре (дни);  $rand$  – случайная величина, равномерно распределённая на  $[0, 1]$ ;  $P_{im}$  – счетчик дней с момента покупки заявки  $i$  ко дню  $m$  (дни);  $t_{im} = \max(0; P_{im} - T_i)$  – количество дней, на которое ко дню  $m$  превышает оговоренный срок доставки заявки  $i$  (аналогично задается для случая с заявками  $j$  из предыдущего периода) (дни);  $f(t_{im})$  и  $f(t_{jm})$  – вероятность отказа в зависимости от количества дней  $t_{im}$  и  $t_{jm}$  соответственно (дни);  $s_{im}$  – пройденное заявкой  $i$  расстояние ко дню  $m$  (км);  $\dot{s}_{jm}$  – пройденное купленной в предыдущий период заявкой  $j$  расстояние ко дню  $m$  (км);  $\tau_{imr}, \dot{\tau}_{jmr}$  – величины, задающие превышение пройденного заявками  $i, j$  пути ко дню  $m$  относительно  $L_r$  (км);  $\lambda_{im}^2, \dot{\lambda}_{jm}^2$  – технические переменные;  $N$  – техническая достаточно большая константа, задаваемая исполнителем программного кода и удовлетворяющая условию  $N \geq L_r$ ;  $\xi$  – случайная величина, задающая расстояние, пройденное заявкой в любой из дней рассматриваемого периода. Распределена по логнормальному закону  $LN(\mu, \sigma^2)$ , где  $\mu, \sigma^2$  – управляющие параметры.

Переменными оптимизации в модели являются бинарные переменные  $y_i$ , задающие факт покупки заявки:  $y_i = 1$ , если куплена заявка  $i$  в текущем периоде и  $y_i = 0$  иначе. Аналогично задается переменная  $\dot{y}_j$  для предыдущего периода.

Модель, минимизирующая суммарные затраты на приобретение сырья на заданном горизонте планирования, имеет следующий вид (1–30):

$$f^* = \sum_i c_i \max_{m \in [1, M+1, 5 * T_i]} \lambda_{im}^1 \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$u_{m+1} = u_m - \tilde{u}_m + \sum_j (\dot{\lambda}_{j(m+1)}^1 - \dot{\lambda}_{jm}^1) v_j + \sum_i (\lambda_{i(m+1)}^1 - \lambda_{im}^1) v_i \quad (2)$$

$$\dot{\lambda}_{jm}^1, \lambda_{im}^1 = \{0, 1\}, u_m \leq \bar{u}, u_m \geq \underline{u}, m = 1: M, u_0 = \text{const} \quad (3)$$

$$f(t_{im}) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \arctg(\beta * t_{im}), \beta = \text{const}, \text{если } t_{im} > 0 \\ 0, t_{im} \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$f(t_{jm}) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \arctg(\beta * t_{jm}), \beta = \text{const}, \text{если } t_{jm} > 0 \\ 0, t_{jm} \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$(1 - \lambda_{im}^1)(f(t_{im}) - \text{rand}) \leq 1 - y_i \quad (6)$$

$$(1 - \dot{\lambda}_{jm}^1)(f(t_{jm}) - \text{rand}) \leq 1 - \dot{y}_j \quad (7)$$

$$P_{im} = P_{i(m-1)} + y_i - \lambda_{im}^1, P_{jm} = P_{j(m-1)} + \dot{y}_j - \dot{\lambda}_{jm}^1 \quad (8)$$

$$s_{i(m-1)} + (1 - \lambda_{im}^1) * y_i * \xi - \tau_{imr} = \lambda_{im}^1 L_r + \lambda_{im}^2 s_{im} \quad (9)$$

$$\dot{s}_{j(m-1)} + (1 - \dot{\lambda}_{jm}^1) * \dot{y}_j * \xi - \dot{\tau}_{jmr} = \dot{\lambda}_{jm}^1 L_r + \dot{\lambda}_{jm}^2 \dot{s}_{jm} \quad (10)$$

$$\tau_{imr} = \lambda_{im}^1 ((s_{im} + \xi) - L_r) \geq 0 \quad (11)$$

$$\dot{\tau}_{jmr} = \dot{\lambda}_{jm}^1 ((\dot{s}_{jm} + \xi) - L_r) \geq 0 \quad (12)$$

$$\lambda_{im}^1 + \lambda_{im}^2 = 1, \dot{\lambda}_{jm}^1 + \dot{\lambda}_{jm}^2 = 1 \quad (13)$$

$$s_{im} \leq L_r - 10^{-17}, r = g^{-1}(i, m) \quad (14)$$

$$\dot{s}_{jm} \leq L_r - 10^{-17}, r = g^{-1}(j, m) \quad (15)$$

$$0 \leq s_{im} \leq N y_i, 0 \leq \dot{s}_{jm} \leq N \dot{y}_j \quad (16)$$

$$y_i \geq \lambda_{im}^1, \dot{y}_j \geq \dot{\lambda}_{jm}^1, \lambda_{im}^1 \geq \lambda_{i(m-1)}^1, \dot{\lambda}_{jm}^1 \geq \dot{\lambda}_{j(m-1)}^1, \dot{y}_j \geq \dot{\lambda}_{jm}^1 \quad (17)$$

$$s_{i0}, P_{i0} = 0, \dot{s}_{j0}, P_{j0} = \text{const} \quad (18)$$

Поясним смысл наиболее важных ограничений модели. Рекуррентное соотношение (2) описывает количество сырья на складе в каждый день с учётом поступления и изъятия для производственного процесса. Переменные  $\lambda_{im}^1$ ,  $\dot{\lambda}_{jm}^1$  отражают факт поступления заявки на склад и тем самым исполнение контракта по этому лоту. В соотношениях (4), (5) последовательно для каждого дня за пределами зафиксированного в контракте срока поставки находится вероятность отказа, которая возрастает с увеличением дня просрочки. Ограничения (6), (7) для недоставленных в данный день (за пределами оговоренного срока) заявок и при решении отказаться от контракта переводят переменную  $y_i$  в состояние «заявка не куплена». Ограничения (9) и (10) задают пройденное грузом расстояние с учётом неопределённости по величине суточного пройденного расстояния.

Таким образом, предлагаемая модель  $F$  является задачей стохастического нелинейного целочисленного программирования.

Для нахождения субоптимального решения построенной модели будем использовать двухэтапный алгоритм:

1. На начальном этапе считываем собранные данные по реализации сырья на бирже. Усредняем показатели (цены и объёмы сырья в заявке и количество заявок)

потока сырья на бирже. Для фиксированного усредненного («базового») потока заявок на бирже находим близкий к оптимальному (на заданном уровне точности) план закупок – «базовый». Модель на этом этапе содержит случайные переменные, задающие неопределённость суточного пройденного пути и соответственно вероятность отказа от контракта.

2. На втором этапе, начиная с первого дня ( $m = 1$ ), последовательно каждый день разыгрываем суточный набор заявок на бирже. Из имеющегося набора заявок выбираем такой план закупок для этого дня, который наиболее близок по объёму сырья к «базовому» и минимизирует суммарные затраты. Для нахождения этого плана закупок используется модель (19). Важно, что для каждого следующего дня учитывается накопленное отклонение закупленных объёмов от «базового» плана. При наступлении в некоторый день критических отклонений по объёмам или накопленным суммарным затратам от «базового» плана данный день берётся за начальную точку планирования, и процесс планирования снова запускается на следующие  $M$  дней.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_i c_i x_i \rightarrow \min, \sum_r \alpha_{mr} \rightarrow \min, m = 1: M \\ (1 - \alpha_{mr})(v_{mr}^n + \Delta_{mr}) \leq \sum_i x_i v_i \leq (1 + \alpha_{mr})(v_{mr}^n + \Delta_{mr}) \\ u_m = u_{m-1} + \sum_i x_i v_i - \tilde{u}_m \\ \Delta_{mr} = \Delta_{(m-1)r} + v_{(m-1)r}^n - \sum_{i:i(m-1,r)} x_i v_i \\ \alpha_{mr} \geq 0, x_i \in \{0; 1\}, \Delta_{0r} = 0, u_m \geq \underline{u}, u_m \leq \bar{u} \end{array} \right. , \quad (19)$$

где  $c_i$  – стоимость заявки  $i$ , включающая стоимость доставки;  $x_i$  – переменная, отражающая факт включения заявки  $i$  в план закупки;  $\alpha_{mr}$  – степень отклонения объема закупаемого сырья в день  $m$  из региона  $r$  от планового («базового») с учётом накопившегося отклонения;  $v_{mr}^n$  – плановый («базовый») объем сырья, который необходимо закупить в день  $m$  из региона  $r$ ;  $\Delta_{mr}$  – накопившееся ко дню  $m$  отклонение объема закупаемого в регионе  $r$  сырья от «базового» ( $m^3$ ).

Построенная модель (19) представляет собой мультикритериальную задачу математического программирования. Для нахождения ее решения зададим некоторое значение  $\alpha_{mr}$  и найдём решение модели по первому критерию. Далее будем последовательно уменьшать значения  $\alpha_{mr} \geq 0$ , пока не будет выполняться условие (20):

$$\forall m, r > 0 \quad |\alpha_{mr}^{iter} - \alpha_{mr}^{iter-1}| \leq \varepsilon, \quad (20)$$

где  $\alpha_{mr}^{iter}$  – значение  $\alpha_{mr}$  на итерации  $iter$ ,  $\varepsilon$  – заданная точность.

Проведённые вычислительные эксперименты (рисунки 1 и 2) показали, что предлагаемая модель позволяет строить устойчивый субоптимальный план закупок. Для каждой реализации, как случайного потока заявок на бирже, так и случайностей при доставке до потребителя, два основных показателя (накопленные затраты на покупку сырья и объём сырья на складе) лежат в некотором доверительном коридоре около «базового» плана закупок. Ширина коридора на уровне доверия 0,95 позволяет избегать простоев производства при приемлемом отклонении по затратам от усреднённого значения.

Таким образом, предложена оптимизационная модель процесса формирования устойчивых цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи с учетом вероятности пройденного расстояния за сутки и отказа от лота, если последний находится в пути достаточно долго, а также с учетом неопределённости потока предложений заявок на товарно-сырьевой бирже. Модель (1–32) является двухпериодной: на первом этапе

находится «базовое» решение, на втором – в зависимости от реализации случайных величин минимизируется отклонение от базового. Модель позволяет формировать цепочки поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях неопределенности потоков предложения и с учетом изменения качества продукции и пропускной способности по путям и сообщениям.

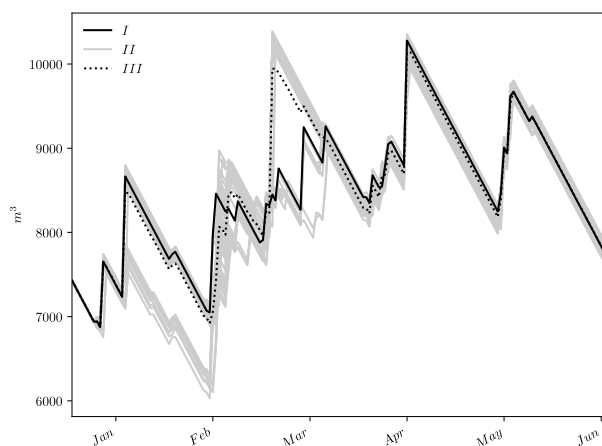


Рисунок 1 – Накопленный запас сырья по дням,  $\text{м}^3$

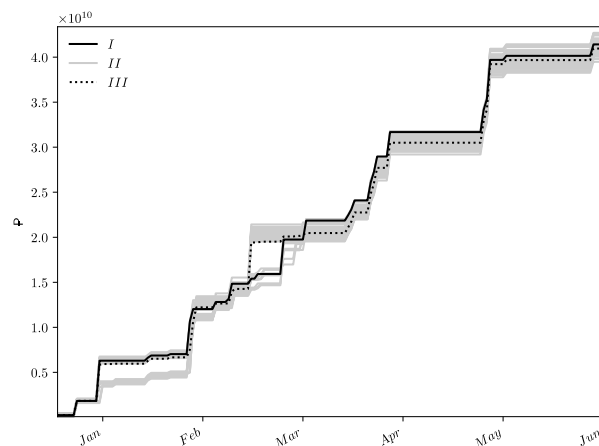


Рисунок 2 – Накопленный объем издержек по дням, руб.

**2. Разработан метод нахождения решения частной задачи нелинейного стохастического программирования, моделирующей процесс формирования устойчивых цепочек поставок сырья с биржи. Метод позволяет за приемлемое вычислительное время находить решение модели, близкое к субоптимальному, и представляет собой эвристический алгоритм, использующий на отдельных шагах метод ветвей и границ и генетический алгоритм (С. 60-72).**

Анализ походок к решению задач нелинейного стохастического программирования показал отсутствие единого метода для задач этого класса. Поэтому для модели (1–32) разработан метод поиска субоптимального решения.

Поиск субоптимального решения разделим на два этапа: поиск допустимого решения (*алгоритм А*), поиск эффективного решения путем улучшения допустимого (*алгоритм В*).

*Алгоритм А* (рисунок 3) представляет собой последовательное построение дерева решений по дням, при этом для каждого дня выбирается минимальная по стоимости заявок комбинация. Для более быстрого нахождения первого допустимого решения для каждого дня, кратного значению  $k$ , комбинация заявок выбирается случайно. Если на каком-то шаге уровень запаса сырья упал ниже  $u^{min}$ , то предстоит вычеркнуть из рассмотрения текущую комбинацию заявок и перейти к следующей по стоимости. Если в текущий день множество комбинаций заявок пусто и выбирать не из чего, то переходим на предыдущий шаг и изменяем по этому же правилу решение. Как только будет найдено первое допустимое решение, алгоритм заканчивает работу.

*Алгоритм В* (рисунок 4) заключается в последовательном выполнении шагов по тестированию полученного решения на предмет его устойчивости, по размножению и случайной мутации, селекции, направленной модификации, селекции и изучению сложившейся ситуации для остановки алгоритма.

Рассмотрим подробнее алгоритмы *А* и *В*. Будем искать решения на интервале издержек  $ТС(1 \pm \vartheta)$ , где  $\vartheta$  – значение разброса (в % от значения минимальных издержек одного из решений  $ТС$ ). Зададим некоторое значение  $k$ . Разработанный

алгоритм используется при моделировании процесса управления цепочками поставок сырья на производственные предприятия с учётом неопределённости. Алгоритм позволяет с применением модели  $F$  получать базовый план закупок сырья (базовое решение), обеспечивающий на требуемом уровне потребности лесопромышленного предприятия.



Рисунок 3 – Блок-схема работы алгоритма А



Рисунок 4 – Блок-схема работы алгоритма В

Неопределённости и риски, связанные с отклонениями от договорного времени поставки, учитываются путем неоднократного разыгрывания величин в ходе поиска решения. Оптимизация проводится по булевым переменным, которые отражают факт принятого решения относительно соответствующей заявки на предмет ее включения в портфель закупок.

Для апробации алгоритма зададим входные значения (таблица). Алгоритму предстоит работать с опубликованными данными биржи. Рассмотрим два разных периода  $M$ : с 1 февраля 2019 года (150 дней) и с 1 февраля 2019 года (365 дней). За

весь временной интервал в торгах участвовали Иркутская область ( $r = 1$ ), Республика Удмуртия (далее – Удмуртия) ( $r = 2$ ), Московская область ( $r = 3$ ) и Пермский край ( $r = 4$ ). За рассматриваемые периоды поступило 212 и 759 заявок соответственно. В качестве скользящего периода планирования  $M$  был взят временной интервал в 1 месяц. Производство расположено в г. Спасске-Дальнем (Приморский край, Россия).

Таблица – Входные данные для решения тестовой задачи по формированию устойчивых цепочек поставок сырья

№	Параметры	Значение
1	$u^{max}$ , м <sup>3</sup>	7500
2	$u^{min}$ , м <sup>3</sup>	100
3	$\tilde{u}$ , м <sup>3</sup>	183
4	$L_r$ , км	[3242, 7232, 8200, 7892]
5	$\dot{M}$ , месяц	$M$
6	$\xi$ , км	$\sim N(1050, 250^2)$
7	$k$ , день	4

Считаем, что на начало работы алгоритма поток  $\dot{v}_{ir}$  представляет собой 2 заявки суммарным объемом 143 м<sup>3</sup>, следующие из Иркутской области. Отметим, что бюджет предприятия не ограничен.

Поясним пункт 5 таблицы. Алгоритм будет работать из расчета на два месяца планирования, но лишь первый месяц будет записан в вектор решения. Каждый месяц алгоритм будет запускаться заново со сдвигом на один месяц для учета следующих двух. Так планируется учитывать тенденцию изменения наличия сырья на бирже в каждый отдельный месяц. Максимальное время поиска решения составляет 3 часа.

**Анализ результатов работы алгоритма.** Оценка эффективности работы авторского алгоритма (далее – АА) проведена сравнением с методом ветвей и границ (далее – МВиГ), генетическим алгоритмом (далее – ГА). Были выбраны 4 разных процессора. Оперативная память компьютера 16 Гб. Для адекватности оценки эффективности работы АА и ГА каждый был запущен по 25 раз для каждого значения горизонта планирования.

Рассмотрим результаты тестирования алгоритмов. При реализации МВиГ было получено решение для горизонта планирования в 150 дней. Однако на больших горизонтах планирования этот алгоритм показал себя слабо эффективным. В то же время АА и ГА показали себя лучше и в процессе их работы удалось отыскать эффективные решения.

Рассмотрим количество изменений вектора закупок при нахождении эффективного решения. АА показал себя с лучшей стороны относительно МВиГ, потому что в процессе работы алгоритма удалось отыскать больше допустимых решений, а это значит, что на более сложных задачах можно перебрать больше промежуточных решений, что скажется на качестве конечного эффективного решения. При рассмотрении результатов работы пары алгоритмов ГА и АА в разрезе любого горизонта планирования стоит отметить, что ГА более нестабилен по количеству изменений вектора закупок в зависимости от типа процессора и горизонта планирования.

Рассмотрим время работы алгоритмов. Из всех трех алгоритмов лишь АА выходил из цикла раньше. Более того, его результаты работы были лучше, чем у ГА, но хуже, чем у МВиГ. Последнее объясняется тем, что МВиГ – это алгоритм, который сходится к оптимальному решению, в то время как у ГА и у АА нет таких гарантий.

На рисунке 5 изображена динамика величины издержек для разных алгоритмов, горизонтов планирования и процессоров. Для определенности будем вести нумерацию подграфиков с верхнего левого угла, слева направо последовательно. В краткосрочной перспективе планирования по конечному значению целевой функции лидирует МВиГ. На подрисунке 5(4) видно, что есть промежуток, когда АА находит решение с меньшим значением издержек. Но меньшее значение издержек на интервале достигается лишь в краткосрочной перспективе, в то время как в долгосрочном периоде МВиГ показывает меньшее значение конечных издержек.

Исходя из подрисунка 5(2) очевидно, что ГА и АА ведут себя примерно одинаково ввиду того, что эти два алгоритма плохо себя показывают на небольших выборках, так как АА основан на скрещивании ГА и МВиГ, а ГА, в свою очередь, не является эффективным на такой размерности выборок. Не исключено, что при увеличении числа входных параметров и/или периода планирования ГА и АА продемонстрируют результаты лучше.

Аналогичные выводы можно сделать при тестировании алгоритмов на больших горизонтах планирования.

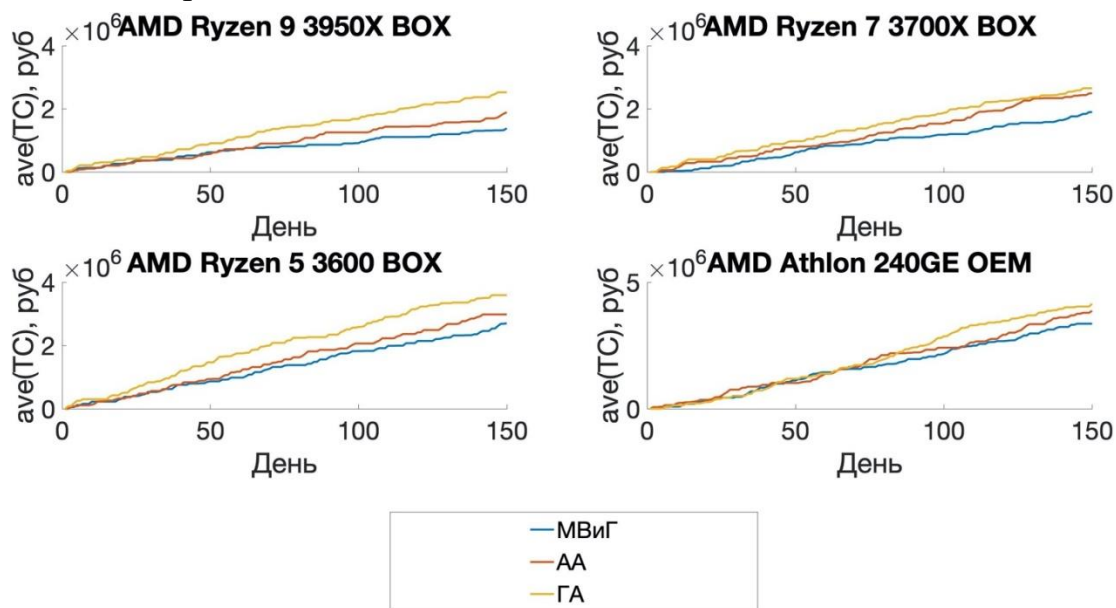


Рисунок 5 – Накопленные издержки для горизонта планирования в 150 дней

При тестировании алгоритмов на большом и среднем горизонтах планирования МВиГ показал себя слабо эффективным, в то время как АА и ГА показали себя лучше. Работа генетического алгоритма была более нестабильной по сравнению с АА на всех горизонтах планирования.

**3. Разработана модель, позволяющая формировать субоптимальную ценовую политику предприятия на горизонте планирования с учетом подпроцесса закупки сырья на региональных рынках, неопределённости рыночного спроса на готовую продукцию, технологичности производственного процесса, логистики поставки готовой продукции на рынок (С. 91-102).**

Одна из сложных проблем, с которой сталкивается предприятие, касается формирования цен конечных видов товаров на основе комплексного рассмотрения вопросов об объемах производства, источниках закупаемого сырья, о способе и методе транспортировки конечного вида продукции до заказчика. Отметим, что комплексное рассмотрение формирования цепочек поставок и ценовой политики предприятия является значимым в процессе ведения хозяйства предприятиями, т.к. рассматриваемые подпроцессы взаимосвязаны и взаимозависимы.

Рассмотрим приобретение сырья на внебиржевом рынке путём заключения прямых договоров с владельцами участков из различных регионов РФ. На основе анализа внебиржевых региональных рынков за 2017–2020 годы найдены оценки значений параметров потока предложений лесодобывающих агентов в зависимости от времени года. Прогнозируемые потоки предложений сырья на региональном рынке в модели будем считать детерминированными. Из имеющегося потока предложений на рынке будем выбирать такой объем сырья, который необходим производству. При этом считается, что имеется возможность выбора объема сырья по каждой имеющейся на рынке заявке.

Из имеющегося на складе сырья производятся товары конечного потребления. По всем видам продукции задаются нормы потребляемого типа сырья на производство каждой единицы товара. Количество сырья на складе может колебаться между неприкосновенным запасом и максимальной вместимостью склада. Объёмы ежедневного производства по каждому виду товаров являются одними из переменных оптимизации в модели, зависимыми от спроса на рынке и наличия сырья на складе. Кроме того, необходимо учитывать ограничения технологических линий и пропускные возможности транспортных коридоров, по которым пойдёт готовая продукция, величину спроса в каждом конечном пункте и возможность поступления покупателю готовой продукции по смежным дугам транспортного графа.

При моделировании спроса на готовую продукцию будем учитывать неопределённости на рынке в целом (на интервале одна неделя) и изменение спроса на выпускаемую продукцию при изменении нашей цены. Считаем, что относительное изменение цен за неделю, связанное с неопределённостью рынка в целом, не превосходит некоторое заданное значение. При калибровке и адаптации модели используются оценки параметров моделирующей зависимости, полученные на основе базы данных предприятия по объемам спроса и продаж.

Рассмотрим допущения в рамках логистической подзадачи. Будем считать, что каждый товар транспортируется отдельно друг от друга. Контейнеры в ходе транспортировки могут переключаться с одного вида транспорта на другой, а на железной дороге между подвижными составами на станциях остановки. Транспортные издержки будут формироваться исходя из количества прикреплений к подвижному составу или перезагрузок, поэтому стоимость перевозки определяется по факту прохождения по дуге транспортного графа, а не по мере подсчета количества контейнеров. Возможность возвращения контейнеров обратно на склад предприятия не рассматривается. Для минимизации быстро растущего числа ограничений в рамках транспортной подзадачи будем её решать раз в неделю на всем горизонте планирования. Важными также являются ежедневный мониторинг состояния бюджета предприятия и выполнение условия его положительности.

Для решения выше сформулированной задачи введем следующие переменные и обозначения:  $k$  – вид производимой продукции,  $k = 1, \dots, K$ ;  $l$  – вид сырья для производства продукции,  $l = 1, \dots, L$ ;  $m$  – номер дня в рамках рассматриваемого



горизонта планирования,  $m = 1, \dots, M$ ;  $w$  – номер недели в рамках рассматриваемого горизонта планирования (определяется в зависимости от номера дня),  $w = 1, \dots, W$ ;  $s$  – номер месяца в рамках рассматриваемого горизонта планирования,  $s = 1, \dots, S$ ;  $c_{ilrm}$  – цена покупки заявки  $i$  сырья типа  $l$  в регионе  $r$  в день  $m$  (руб.), включая стоимость доставки;  $V_{ilrm}$  – объем сырья типа  $l$  в заявке  $i$  из региона  $r$  в день  $m$  ( $\text{м}^3$ );  $v_{ilrm}$  – покупаемый объем сырья типа  $l$  в заявке  $i$  из региона  $r$  в день  $m$  ( $\text{м}^3$ );  $u_{lm}$  – запас на складе сырья типа  $l$  день  $m$  ( $\text{м}^3$ );  $u_m^{\max}$  – максимальная вместимость склада в день  $m$  ( $\text{м}^3$ );  $u_i^{\min}$  – уровень неприкосновенного (страхового) запаса сырья типа  $l$  на складе в любой из дней на всем горизонте планирования ( $\text{м}^3$ );  $v'_{ilrm}$  – объем сырья типа  $l$ , купленный в предыдущем периоде, про который известно, что он поступит на склад в день  $m$  ( $\text{м}^3$ );  $A_{ik}^s$  – объем затрат ресурса  $l$  на производство единицы продукции  $k$  в месяце  $s$  ( $\text{м}^3$ );  $p_{km}$  – разница между выручкой и затратами на технологический производственный процесс товара типа  $k$  в день  $m$  (далее, цена) (руб.);  $FC_n$  – фиксированные издержки для имитационной итерации  $n$  (руб.),  $n = 1, \dots, N$ ;  $x_{km}$  – объем производства товаров типа  $k$  в день  $m$  (шт.);  $z_{ijkw}$  – объем продукции  $k$ , перевозимой между пунктами  $i$  и  $j$  в неделю  $w$  (шт.);  $Z_{ijw}$  – пропускная способность дуги между пунктами  $i$  и  $j$  на неделе  $w$  (шт.);  $\tilde{z}_{ijw}$  – индикатор использования дороги из пункта  $i$  в пункт  $j$  на неделе  $w$  в графе-решении транспортной подзадачи;  $\theta_{ijw}$  – фиксированная ставка прохождения груза со станции или пункта  $i$  следующая в пункт  $j$  в неделю  $w$  (руб.) с учётом затрат на изменение типа транспортного средства;  $I$  – количество заявок, которые были выкуплены предприятием в предыдущий период (до момента  $t = 0$ ) и для которых даты прихода на склад известны;  $R$  – количество регионов, из которых поступают заявки;  $T_r$  – норма временных затрат (в днях) на доставку любого объема сырья из региона  $r$  по железной дороге,  $r = 1, \dots, R$ ;  $Q_{j^*kw}$  – спрос розничной компании  $j^*$  на продукцию  $k$  в неделю  $w$ ;  $\bar{Q}_{j^*kw}$  – математическое ожидание объема спроса розничной компании  $j^*$  на продукцию  $k$  в неделю  $w$ ;  $M_1$  – количество дней текущего периода, для которых закупленные заявки поступят на склад в течение следующего периода;  $J$  – множество вершин в транспортном графе;  $J^{\text{out}}$  – множество вершин, инцидентных пункту производства;  $J^*$  – множество розничных торговцев (конечных пунктов назначения произведенной продукции);  $B_0$  – бюджет предприятия, отведенный для ведения торгов, по состоянию на момент начала работы модели;

При отсутствии заданного объема производства на некотором интервале после горизонта планирования может возникнуть ситуация, в которой к концу периода  $M$  объем закупа сырья будет стремиться к 0, что противоречит производственному циклу – производство не закроется и будет работать дальше, но для этого у него не будет сырья. В связи с этим добавим некоторые значения производства, которые будут положены после завершения горизонта планирования.

$x_{km1}$  – гипотетический объем производства продукции типа  $k$  в день  $t = M + 1, \dots, M_1$ , который определяется следующим образом:

$$x_{km1} = \left[ \frac{1}{2} \left( \max_{m^* \in [m-t, m]} (x_{km^*}, x_{k(m^*-1)1}) + \min_{m^* \in [m-t, m]} (x_{km^*}, x_{k(m^*-1)1}) \right) \right],$$

где  $t$  – количество дней, за которые выбираются максимальные и минимальные значения  $x_{km}^*$  в приведенных ниже ограничениях.

Значения параметров  $u_{l0}$ , и  $B_0$  задаются и соответствуют последнему дню предыдущего периода. В качестве целевой функции будем рассматривать доналоговую прибыль предприятия на горизонте планирования  $M$ . Тогда математическая запись задачи оптимизации приобретает следующий вид (21–44):

$$\max_p \max_{x,v,z,\tilde{z}} \sum_m (\sum_k p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r} c_{ilrm} v_{ilrm} - \sum_{i,j} \theta_{ijw} \tilde{z}_{ijw}) \quad (21)$$

$$u_{lm} = u_{l(m-1)} + \sum_{i,r} v_{ilr(m-T_r)} + \sum_{i,r} v'_{ilr(m-T_r)} - \sum_k A_{lk}^s x_{km} \quad (22)$$

$$\sum_l u_{lm} \leq u_m^{max}; m = 1, \dots, M + M_1 \quad (23)$$

$$u_{lm} \geq u_l^{min}; l = 1, \dots, L; m = 1, \dots, M + M_1 \quad (24)$$

$$\sum_k A_{lk}^s x_{km} \leq u_{lm}; l = 1, \dots, L; m = 1, \dots, M \quad (25)$$

$$B_0 + \sum_{m=1}^{m^*} (\sum_k p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r} c_{ilrm} v_{ilrm} - \sum_{i,j} \theta_{ijw} \tilde{z}_{ijw} - FC_n) \geq 0; m^* = 1, \dots, M \quad (26)$$

$$0 \leq v_{ilrm} \leq V_{ilrm} \quad (27)$$

$$\sum_j z_{ijkw} = \sum_i z_{ijkw}; k = 1, \dots, K; w = 1, \dots, W; i, j \in J \quad (28)$$

$$\sum_{j \in J^{out}} z_{1jkw} = \sum_{m=(w-1) \cdot 7 + 1}^{w \cdot 7} x_{km}; k = 1, \dots, K; w = 1, \dots, W \quad (29)$$

$$\sum_i z_{ij^*kw} \leq Q_{j^*kw}; j^* \in J^*; k = 1, \dots, K; w = 1, \dots, W \quad (30)$$

$$\sum_k z_{ijkw} \leq \tilde{z}_{ijw} z_{ijw}; i, j \in J; w = 1, \dots, W \quad (31)$$

$$B_0 = const \quad (32)$$

$$u_{l0} = const \quad (33)$$

$$u_{lm}, x_{km}, v_{ilrm} \in Z^+ \quad (34)$$

$$z_{ijkw} \geq 0 \quad (35)$$

$$\tilde{z}_{ijw} \in \{0; 1\} \quad (36)$$

$$u_{lm} = u_{l(m-1)} + \sum_{i,r} v_{ilr(m-T_r)} + \sum_{i,r} v'_{ilr(m-T_r)} - \sum_k A_{lk}^s x_{km1} \quad (37)$$

$$p_{km} = const; m = 1, \dots, 7; k = 1, \dots, K \quad (38)$$

$$\left| \frac{p_{k(m+1)} - p_{km}}{p_{km}} \right| \leq \gamma; m > 7; k = 1, \dots, K \quad (39)$$

$$A_{lk}^{s+1} = \max(0, \min(A_{lk}^s, [A_{lk}^s + \varepsilon_{lk}^{(1)}])); \varepsilon_{lk}^{(1)} \in [-\alpha^{(1)}, \beta^{(1)}] \quad (40)$$

$$u_{m+1}^{max} = \max(u_m^{max}, u_m^{max} + \varepsilon_m^{(2)}), \varepsilon_m^{(2)} \in [-\alpha^{(2)}, \beta^{(2)}] \quad (41)$$

$$Q_{nkw} = (\bar{Q}_{nkw} + \varepsilon_{nkw}^{(4)}) \cdot \rho_{nkw}; \varepsilon_{nkw}^{(4)} \in [-\alpha^{(4)}, \beta^{(4)}] \quad (41)$$

$$\rho_{nkw} = \begin{cases} \frac{c^{(2)}}{c^{(1)}}, \text{ если } \sum_{m=(w-1) \cdot 7 + 1}^{w \cdot 7} \frac{(p_{k(m+7)} - p_{km})}{p_{km}} \geq 0 \\ \left( 1 + \sum_{m=(w-1) \cdot 7 + 1}^{w \cdot 7} \frac{(p_{k(m+7)} - p_{km})}{7 \cdot p_{km}} \right)^{c^{(1)}} \\ c^{(2)} \left( 1 + \left| \sum_{m=(w-1) \cdot 7 + 1}^{w \cdot 7} \frac{(p_{k(m+7)} - p_{km})}{7 \cdot p_{km}} \right| \right)^{c^{(1)}}, \text{ иначе} \end{cases} \quad (43)$$

$$FC_n \in [\alpha^{(3)}, \beta^{(3)}], z_{ijw} \in [\alpha^{(5)}, \beta^{(5)}], \theta_{ijw} \in [\alpha^{(6)}, \beta^{(6)}] \quad (44)$$

где  $\varepsilon_{lk}^{(1)}$ ,  $\varepsilon_m^{(2)}$ ,  $FC_n$ ,  $z_{ijw}$ ,  $c_{ijw}$  – равномерно распределенные случайные величины;  $\varepsilon_{j^*kw}^{(4)}$  – компонента шума случайной величины  $\bar{Q}_{nkw}$  на момент начала недели  $w$  на товар  $k$  для розничного продавца  $j^*$ ;  $\alpha^g, \beta^g \geq 0$ ;  $g = 1, \dots, 6$ ;  $\alpha^g, \beta^g \in Z^+$ ;  $g = 1, \dots, 3$ .

Рассмотрим подробнее выражения (21–44). Цель задачи – найти такое комбинаторное распределение  $p, x, v, u, z, \tilde{z}$ , чтобы значение прибыли (21) было максимально. Объем входного потока готовой продукции равен выходному потоку (28), т.е. на промежуточных пунктах транспортировки готовой продукции не может

оставаться никаких товаров. На граф подается тот объем готовой продукции, который был произведен за рабочую неделю (29). Объем входящего потока готовой продукции в вершины с потребителем не может превосходить его объем спроса (30). Из формулы (38) следует, что цены фиксированы на первый день работы предприятия. Формула (39) показывает, что за день цена может меняться не более, чем на  $100 \cdot \gamma$  %. Формулы (40–44) отражают стохастический характер изменений, т.е. для каждой реализации таких случайных величин будет определяться оптимальное или субоптимальное решение системы.

Из формул (21–44) следует, что модель является нелинейной и стохастической. Полученную задачу, согласно работе, можно классифицировать как задачу стохастического программирования с детерминированной целевой функцией и стохастическими ограничениями. Поиск оптимального решения в задачах стохастического программирования нетривиален и всегда требует частного подхода, особенно если целевая функция или ограничения нелинейные.

Задачу (21–44) можно свести к двухэтапной модели, где на первом шаге разыгрываются значения стохастических параметров, фиксируется вектор цен и решается классическая задача смешанно-целочисленного программирования, а на втором шаге применяются штрафные функции и метод градиентного спуска для изменения вектора цен реализации товаров.

Для решения задачи (21–44) будем проводить итерационный поиск субоптимального решения с использованием двух подзадач – этапов (поиск оптимального плана производства, доставки сырья и товаров и поиск субоптимального вектора цен для реализации товаров).

**Этап 1.** Решить задачу с линейными ограничениями и разыгранными значениями параметров с целевой функцией вида (45):

$$\max_{x,v,z,\tilde{z}} \sum_m \left( \sum_k p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r} c_{ilrm} v_{ilrm} - \sum_{i,j} \theta_{ijw} \tilde{z}_{ijw} \right), \quad (45)$$

где  $x = \{x_{km}\}_{km}$ ,  $v = \{v_{ilrm}\}_{ilrm}$ ,  $z = \{z_{ijkw}\}_{ijkw}$ ,  $\tilde{z} = \{\tilde{z}_{ijw}\}_{ijw}$ .

На первой итерации  $iter = 1$  вектор  $p = \{p_{km}\}_{km}$  генерируется случайным образом с заданным начальным условием (39). Разыгрывается объем спроса (при повторном применении этапа 1 на следующей итерации будут использоваться значения цен, полученные на предыдущей итерации этапа 2). Значения всех параметров разыгрываются каждую итерацию. Поиск решения задачи осуществляется с использованием метода ветвей и границ.

**Этап 2.** Для фиксированных значений  $x_{km}$ ,  $v_{ilrm}$ ,  $z_{ijkw}$ ,  $\tilde{z}_{ijw}$ , полученных на этапе 1, следует решить оптимизационную задачу:

$$\max_p \sum_m \left( \sum_k p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r} c_{ilrm} v_{ilrm} - \sum_{j,j} \theta_{ijw} \tilde{z}_{ijw} \right) \quad (46)$$

$$p_{km^*} \cdot (1 - \gamma) \leq p_{k1+m^*} \leq p_{km^*} \cdot (1 + \gamma); m^* = 1, \dots, M - 1 \quad (47)$$

**Этап 3.** После этапа 2 необходимо проверить значение разности значений прибыли. Повторять последовательно этапы 1 и 2 до тех пор, пока значение прибыли  $\varnothing$  итераций подряд не начнет меняться меньше, чем на значение  $\varnothing$ , выйти из алгоритма. На этапе 1 решается задача линейной оптимизация, на втором – задача нелинейного программирования. Для поиска оптимального решения

воспользуемся градиентным спуском и штрафными функциями. Тогда задача для этапа 2 примет вид (48–53) с правилом итерирования (54):

$$F(p) = \sum_m \left( \sum_k p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r} c_{ilrm} v_{ilrm} - \sum_{i,j} \theta_{ijw} z_{ijw} \right) + \frac{\lambda^1}{2} [G_1]_-^2 - \lambda^2 G_2 \rightarrow \max_p \quad (48)$$

$$G_1(p, j^*, k, m) = \sum_i z_{ij^*kw} - \left( \bar{Q}_{nkw} + \varepsilon_{j^*kw}^{(4)} \right) \cdot \rho_{nkw}(p) \quad (49)$$

$$G_2(p, k, m) = \frac{(p_{k1+m} - p_{km})_+^2}{2} + \frac{(p_{km} - p_{k1+m})_+^2}{2} \geq 0 \quad (50)$$

$$(p_{k1+m} - p_{km})_+^2 = \begin{cases} (p_{k1+m} - p_{km})^2, & \text{если } p_{k1+m} - p_{km} \cdot (1 - \gamma) \leq 0 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (51)$$

$$(p_{km} - p_{k1+m})_+^2 = \begin{cases} (p_{km} - p_{k1+m})^2, & \text{если } p_{km} \cdot (1 + \gamma) - p_{k1+m} \leq 0 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (52)$$

$$[G_1(p, j^*, k, m)]_-^2 = \min \left( 0, \left( \sum_i z_{ij^*kw} - \left( \bar{Q}_{nkw} + \varepsilon_{j^*kw}^{(4)} \right) \cdot \rho_{nkw}(p) \right) \right)^2 \quad (53)$$

$$p^{(iter+1)} = p^{(iter)} - h \nabla F(p^{(iter)}) \quad (54)$$

где  $m = 1, \dots, M$ ;  $p^{(iter)}$  – вектор цен на итерации  $k$ ;  $h$  – величина шага;  $\lambda^1 = (\lambda_{j^*km}^1)_{j^*km}$  и  $\lambda^2 = (\lambda_{km}^2)_{km}$  – векторы, элементами которых являются большие числа.

Критерием останова будем считать достижение такого значения  $iter$ , при котором выполняется неравенство  $\nabla F(p^{(iter+1)}) - \nabla F(p^{(iter)}) \leq \varphi$ .

Рассмотрим формулы (48–54) подробнее. Формула (48) – целевая функция со штрафами  $\frac{\lambda^1}{2} [G_1]_-^2, \lambda^2 G_2$ . Ограничение (49) отражает разность между доставленным до заказчика объемом продукции и значением спроса того же заказчика. Если значение цены выходит за рамки ограничений (50–53), то целевая функция получает штраф. Формула (54) – правило подсчета вектора цен.

Данная модель позволяет максимизировать значение доналоговой прибыли и представляет собой задачу математического программирования, отличающуюся комплексной возможностью одновременного учета производственных норм потребления сырья для выпуска конечной продукции, формирования вектора закупок сырья на товарно-сырьевой бирже, формирования вектора объемов транспортировки готовой продукции по транспортному графу и формирования ценовой политики предприятия. Результаты реализации модели включают структуру производства, последовательность закупки производством сырья на товарно-сырьевой бирже, последовательность транспортировки конечной продукции покупателям, а также значение прибыли за каждый день работы предприятия и вектор цен на рассматриваемом горизонте планирования. Апробация предложенной модели и схемы оптимизации с входными данными предприятия отражают объемы производства, логистики и объемов закупа сырья у частных предприятий на всем горизонте планирования, изменение цен во времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании разработаны и апробированы авторские экономико-математические инструменты:

1. Метод формирования устойчивых цепочек поставок сырья с учётом неопределённостей внешней среды, в основе которого лежит нелинейная стохастическая модель закупки сырья на товарно-сырьевой бирже. Модель позволяет сформировать субоптимальный план обеспечения предприятия сырьём на среднесрочном периоде и хеджировать риски, связанные со стохастичностью потока предложений на бирже и логистикой доставки. Особенности модели являются: возможность взаимодействовать с товарно-сырьевыми биржами с учётом неопределённостей по количеству суточных предложений, их объёмам и ценам, учёт риска отказа от заключённого договора в связи с потерей качества сырья во время доставки и невыполнением сроков доставки. К переменным оптимизации относят факты принятия решения о покупке в определенный день соответствующего лота на бирже с заданными характеристиками. Целевая функция минимизирует суммарные затраты на покупку сырья на горизонте планирования. Модель апробирована на данных предприятия Приморского края и крупнейшей товарно-сырьевой биржи России. Проведен анализ чувствительности модели к основным входным параметрам.

2. Оптимизационный двухэтапный алгоритм поиска решения модели формирования устойчивых цепочек поставок сырья с товарно-сырьевых бирж, представляющий собой эвристический алгоритм с использованием метода ветвей и границ и генетического алгоритма. Алгоритм содержит два этапа (поиск допустимого решения и поиск улучшенного решения) и позволяет за приемлемое вычислительное время находить на заданном интервале времени решение частной задачи нелинейного стохастического программирования, близкое к субоптимальному. В ходе поиска решения проводится тестирование найденного решения на предмет устойчивости.

3. Оптимизационная модель формирования вектора цен на всю реализуемую линейку товаров на основе комплексного рассмотрения вопросов об объемах производства с учетом неопределенности спроса на товары, способе и методе транспортировки конечного вида продукции до заказчика и обеспечении технологического процесса сырьём требуемого объема и качества. Предложена двухэтапная итерационная схема нахождения субоптимального вектора цен, на первом этапе которой методом ветвей и границ находится оптимальный план производства и логистики, а на втором посредством градиентного спуска и штрафных функций определяется вектор цен, максимизирующий доналоговую прибыль. Апробация модели проведена на данных одного из крупных предприятий лесопромышленной отрасли Приморского края.

Практическая значимость исследования заключается в предоставлении топ-менеджменту лесопромышленных предприятий инструментов, позволяющих повысить эффективность принятия решений по формированию субоптимального плана закупки сырья на товарно-сырьевых биржах и ценовой политике на всем горизонте планирования с учетом имеющихся неопределенностей.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в журналах, входящих в базу данных Scopus**

1. Mazelis L., Rogulin R. Devising a method for the formation of sustainable chains of supply of raw materials from mercantile exchange to a timber processing enterprise considering uncertainties and risks // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. –Т. 5. – С. 6–18 (1,01 п.л. / 1,43 п.л.).

2. Рогулин Р. С. Математическая модель формирования ценовой политики и плана производственно-транспортной системы лесопромышленного предприятия // Бизнес-информатика. – 2021. – Т. 15, № 3. – С. 60–77 (1,43 п.л. / 1,43 п.л.).

3. Рогулин Р. С. Модель оптимизации плана закупок сырья из регионов России лесоперерабатывающим комплексом // Бизнес-информатика. – 2020. – Т. 14, № 4. – С. 19–35 (1,27 п.л. / 1,27 п.л.).

**Публикации в рецензируемых научных изданиях,  
рекомендованных ВАК РФ**

4. Рогулин Р. С., Мазелис Л. С. Алгоритм и математическая модель формирования устойчивых цепочек поставок древесного сырья из регионов России: сравнение и анализ // Вестник Пермского университета. Сер. «Экономика». – 2020. – Т. 15, № 3. – С. 385–404 (0,96 п.л. / 1,37 п.л.).

**Публикации в других научных изданиях**

5. Рогулин Р. С. Оптимизация плана формирования устойчивых цепочек поставок сырья с товарно-сырьевых бирж // Материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных по естественным наукам, 2021. – С. 254–256 (0,14 п.л. / 0,14 п.л.).

6. Рогулин Р. С. Апробация методики формирования устойчивых цепочек поставок сырья лесопромышленной отрасли с товарно-сырьевой биржи России на склад предприятия // Материалы научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов 2021» / МГУ им. Ломоносова, 2021. – С. 1–3 (0,16 п.л. / 0,16 п.л.).

7. Рогулин Р. С. Формирование ценовой политики предприятия лесопромышленной отрасли на горизонте планирования // XXII Всероссийский симпозиум «Стратегическое планирование и развитие предприятий» / ЦЭМИ РАН, 2021. – С. 189–191 (0,17 п.л. / 0,17 п.л.).

8. Рогулин Р. С., Мкоян Т. Э., Рогулин Д. С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для оптимизации планирования организации производства на лесопромышленном предприятии»: охранный документ №RU 2021616675 от 20.04.2021.

9. Рогулин Р. С., Рогулин Д. С., Мкоян Т. Э. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Поиск оптимальной стратегии предприятия по работе с товарно-сырьевой биржей»: охранный документ № RU 2021617837 от 28.04.2021.

Роголин Родион Сергеевич

**РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТОВ ФОРМИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВЫХ  
ЦЕПОЧЕК ПОСТАВКИ СЫРЬЯ И ПЛАНА ВЫПУСКА ГОТОВОЙ  
ПРОДУКЦИИ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ С УЧЕТОМ  
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ**

Специальность

08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_ .2022

Печать офсетная. Бумага офсетная. Формат 60×84/16

Усл.-печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ

Отпечатано во множительном участке Ресурсного информационно-аналитического центра  
Владивостокского государственного университета экономики и сервиса  
690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 4