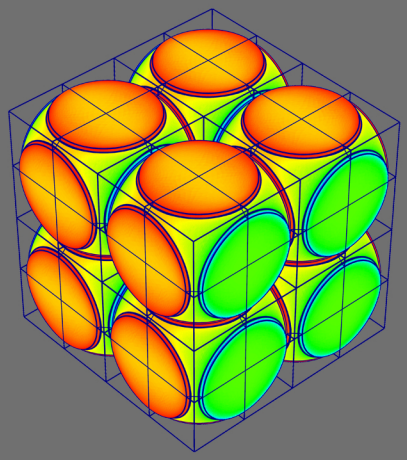
ISSN 2309-3684



Математическое моделирование и численные методы

Рогулин Р.С. Математическая модель формирования цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях риска с опорой на траекторию прибыли за предыдущие периоды. Математическое моделирование и численные методы, 2023,№ 2, с. 129–154.

Источник: https://mmcm.bmstu.ru/articles/311/

Параметры загрузки:
IP: 216.73.216.50
09.10.2026 04:04:39

УДК 338.001.36 DOI: 10.18698/2309-3684-2023-2-129154

Математическая модель формирования цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях риска с опорой на траекторию прибыли за предыдущие периоды

© Р.С. Рогулин

ФГБОУ ВО «ВВГУ», Владивосток, 690000, Россия

Формирование цепочки поставок сырья тесно связано с производственными проблемами деревообрабатывающих предприятий. Построение цепочек поставок сырья и оптимальный расчет ежедневного производства были актуальными темами с начала второй промышленной революции. В данной статье рассматривается предприятие Приморского края деревообрабатывающей промышленности, у которого нет делян в аренде. Цель работы состоит в том, чтобы решить проблему построения цепочки поставок сырья с учетом ежедневной загрузки производственных площадей и поиску оптимального решения. Источником сырья выступает товарно-сырьевая биржа, где лоты появляются ежедневно в случайном порядке в разных регионах добычи. В научной литературе существует множество способов расчета наилучшего значения прибыли с учетом множества ограничений, но в них не учтены многие важные для деревообрабатывающих предприятий особенности. Исходя из обзора научной литературы в данной статье представлена математическая модель, которая выступает в роли механизма по принятию решений в каждый отдельный день, и она отличается тем, что может учитывать коэффициент полезного объема сырья, который дойдет до склада и время в пути. Тестирование модели проводилось на данных Российской товарно-сырьевой биржи и компании в Приморском крае. Результатом тестирования модели является вычисленная оптимальная траектория прибыли для каждого набора данных об объемах сырья, времени лотов в пути, а также множество важных показателей для любого производства: объем прибыли, объем производства товаров. Анализ полеченных решений показал, что существуют сложности в планировании цепочек поставок и объемов производства. Проанализированы регионы в качестве источников сырья, из каких регионов и когда стоит закупать сырье. Приведены недостатки и положительные стороны математической модели.

Ключевые слова: *оптимизация производства, транспортная задача, лесная промышленность, товарно-сырьевая биржа, цепочки поставок, выпуск продукции*

Введение. Древесина является ценным природным ресурсом, который веками широко использовался в различных отраслях промышленности, включая строительную, мебельную, бумажную и энергетическую. Мировой спрос на древесину и продукцию из нее в последние годы неуклонно растет, при этом лесная промышленность играет значительную роль в экономике многих стран. Однако устойчивое управление цепочками поставок древесины — это сложный и многогранный процесс, в котором участвуют многочисленные заинтересованные стороны и возникают проблемы.

Чтобы удовлетворить растущий спрос на продукцию из древесины, необходимо обеспечить эффективность, рентабельность и устойчивость цепочки поставок. Управление цепочкой поставок древесины включает в себя несколько процессов, в том числе заготовку древесины, транспортировку, переработку и распределение продукции из древесины конечным пользователям. В управлении этой цепочкой поставок участвует множество заинтересованных сторон, в том числе арендаторы делян, лесозаготовители, предприятия, перерабатывающие древесину, розничные торговцы, и все они должны работать совместно, чтобы обеспечить соответствие поставок лесоматериалов рыночному спросу.

В последние годы математическое моделирование стало ценным инструментом для повышения эффективности и действенности управления цепочками поставок древесины, предоставляя ценную информацию об оптимизации различных процессов, участвующих в цепочке поставок [1]. Математические модели можно использовать для моделирования и анализа различных сценариев и прогнозирования результатов различных решений и действий. Использование математических моделей в управлении цепочками поставок древесины может помочь заинтересованным сторонам выявить потенциальные узкие места, оптимизировать использование ресурсов, снизить затраты и повысить устойчивость [2-4].

Обзор литературы. Цепочка поставок древесины включает в себя сложную и взаимосвязанную систему деятельности, включающую заготовку, транспортировку, переработку и распределение продукции из древесины. Эффективное управление этой деятельностью имеет решающее значение для удовлетворения растущего спроса на продукцию из древесины при одновременном обеспечении устойчивости лесных ресурсов. В последние годы математическое моделирование стало мощным инструментом оптимизации и повышения эффективности управления цепочками поставок древесины. В этом обзоре литературы представлен обзор последних достижений в области математического моделирования в управлении цепочками поставок древесины с 2021 года. Обзор литературы охватывает различные используемые подходы и методы моделирования, конкретные приложения в управлении цепочками поставок древесины, проблемы и возможности, с которыми сталкиваются заинтересованные стороны, а также будущие направления исследований.

Подходы и методы моделирования. Подходы и методы моделирования, используемые в управлении цепочками поставок древесины, различаются в зависимости от конкретных целей, ограничений и наличия данных. Детерминированные и стохастические модели обычно ис-

пользуются в управлении цепочками поставок древесины для оптимизации производительности системы при различных сценариях. Детерминированные модели используются для поиска оптимального решения данной проблемы с учетом фиксированных входных параметров и одной целевой функции [5, 6]. Напротив, стохастические модели включают неопределенность и изменчивость входных параметров и используют статистические методы для оценки вероятностей различных результатов [7, 8]. Методы математического программирования, такие как линейное, целочисленное и динамическое программирование, используются для решения сложных задач оптимизации в управлении цепочками поставок древесины, включая решения проблем о распределении ресурсов, составлении графиков и маршрутизации [9, 10]. Имитационные модели, такие как дискретно-событийные и агентные модели, используются для имитации поведения системы во времени и дают представление о динамическом поведении системы, взаимодействии различных компонентов и эффектах различных политик и вмешательств [11, 12]. Методы машинного обучения, такие как нейронные сети и деревья решений, все чаще используются в управлении цепочками поставок древесины для разработки прогнозных моделей, выявления закономерностей и тенденций в данных и поддержки процессов принятия решений [13, 14]. Выбор подходов и методов моделирования зависит от конкретной проблемы, доступных данных, уровня сложности и желаемого уровня точности и реалистичности.

Оптимизация транспортных операций. Оптимизация транспортных операций является важнейшим аспектом управления цепочкой поставок древесины, поскольку она влияет на стоимость, эффективность и воздействие системы на окружающую среду. Методы математического моделирования широко используются для оптимизации транспортных операций в цепочках поставок древесины. Модели оптимизации транспорта могут решать ряд задач, включая минимизацию транспортных расходов, минимизацию выбросов, максимальное использование транспортных средств и минимизацию времени транспортировки. Эти модели учитывают различные факторы, такие как расстояние, объем, вес, грузоподъемность транспортного средства и дорожные условия, чтобы определить оптимальный маршрут и вид транспорта. Линейное программирование, смешанно-целочисленное линейное программирование и модели сетевых потоков обычно используются для решения задач оптимизации транспортировки в цепочках поставок древесины [2, 4]. Помимо методов математического моделирования, имитационные модели используются для оценки эффективности транспортных операций при различных сценариях и выявления потенциальных узких мест и факторов неэффективности.

Дискретно-событийные имитационные модели, агентные имитационные модели и гибридные имитационные модели используются для моделирования транспортных операций в цепочках поставок древесины [15, 16]. Оптимизация транспортных операций в цепочках поставок древесины требует интеграции множества заинтересованных сторон, включая поставщиков, производителей, дистрибьюторов и перевозчиков. Сотрудничество между заинтересованными сторонами и использование передовых методов оптимизации могут привести к значительному повышению эффективности, устойчивости и устойчивости цепочек поставок древесины.

Проблема управления запасами (inventory problem). Цепочки поставок древесины сталкиваются с уникальными проблемами в управлении запасами из-за характера сырья и продуктов, произведенных из него. Древесина является скоропортящимся товаром, на который могут повлиять изменения температуры, влажности и других факторов окружающей среды. Кроме того, изделия из древесины имеют разную степень стоимости в зависимости от их качества, размера и породы. Поэтому очень важно тщательно управлять уровнями запасов, чтобы обеспечить качество продукции и минимизировать риск дефицита или затоваривания [1].

Одной из ключевых проблем управления запасами в цепочках поставок древесины является неопределенность спроса и предложения. Спрос на лесоматериалы может колебаться в зависимости от конъюнктуры рынка, сезонности и других факторов. На предложение древесины также могут влиять такие факторы, как погодные условия, лесные пожары и правительственные постановления. Поэтому важно разработать модели управления запасами, которые могут справляться с неопределенностью и принимать решения в режиме реального времени на основе доступной информации [3,4].

Еще одной проблемой управления запасами в цепочках поставок древесины является сложность сети цепочек поставок. Цепочки поставок лесоматериалов включают множество заинтересованных сторон, включая поставщиков, производителей, дистрибьюторов и розничных продавцов, у которых могут быть разные правила инвентаризации, сроки выполнения заказов и графики поставок. Следовательно, необходимо разработать модели управления запасами, которые могут учитывать взаимозависимость различных этапов цепочки поставок и соответствующим образом оптимизировать уровни запасов и политику заказа.

В последние годы растет интерес к использованию передовых технологий, таких как Интернет вещей (internet of things, далее IoT) и блокчейн, для улучшения управления запасами в цепочках поставок древесины. Технологии IoT могут предоставлять данные о местонахождении, состоянии и качестве лесоматериалов в режиме реального

времени, которые можно использовать для оптимизации уровня запасов и повышения прозрачности цепочки поставок. Технология блокчейн может обеспечить безопасную и прозрачную платформу для отслеживания движения запасов и транзакций, что может повысить отслеживаемость и подотчетность цепочки поставок [17,18].

В целом управление запасами является важнейшим аспектом управления цепочками поставок древесины, и внедрение передовых подходов к моделированию, методов моделирования и технологических решений может привести к значительному повышению эффективности, рентабельности и устойчивости цепочек поставок древесины.

Проблемы и возможности. Управление запасами в цепочке поставок древесины сталкивается с различными проблемами и открывает возможности для улучшения. Одной из проблем является динамичный и неопределенный характер отрасли. На отрасль влияют несколько факторов, в том числе колебания спроса, сезонность, погодные условия и правительственные постановления. Эти факторы создают серьезные проблемы для компаний по обеспечению оптимального уровня запасов и минимизации дефицита. Однако достижения в моделях и методах управления запасами открыли возможности для решения этих проблем. Методы математического моделирования, такие как динамическое программирование, стохастическое программирование и марковские процессы принятия решений, обычно используются для оптимизации уровней запасов, минимизации затрат на запасы и обеспечения своевременной доставки продуктов клиентам [11,19]. Модели моделирования, такие как моделирование дискретных событий и моделирование на основе агентов, используются для оценки производительности систем управления запасами при различных сценариях и выявления потенциальных узких мест и неэффективности. Кроме того, методы машинного обучения, такие как искусственные нейронные сети и машины опорных векторов, могут использоваться для разработки прогностических моделей, которые могут прогнозировать спрос и оптимизировать уровни запасов [17].

Еще одной проблемой является сложность сети цепочки поставок. Цепочки поставок лесоматериалов включают множество заинтересованных сторон, включая поставщиков, производителей, дистрибьюторов и розничных продавцов, у которых могут быть разные правила инвентаризации, сроки выполнения заказов и графики поставок. Эта сложность может привести к неэффективности управления запасами и отрицательно повлиять на удовлетворенность клиентов. Для решения этой проблемы внедрение передовых технологий, таких как Интернет вещей (IoT) и блокчейн, может помочь улучшить управление запасами в цепочках поставок древесины. Интернет вещей может в режиме ре-

ального времени предоставлять данные о местонахождении, состоянии и качестве лесоматериалов, которые можно использовать для оптимизации уровня запасов и повышения прозрачности цепочки поставок. Технология блокчейн может обеспечить безопасную и прозрачную платформу для отслеживания движения запасов и транзакций, что может повысить отслеживаемость и подотчетность цепочки поставок [14].

Таким образом, управление запасами в цепочках поставок древесины является сложной и сложной задачей, требующей учета различных факторов. Однако передовые подходы к моделированию, методы моделирования и технологические решения открывают широкие возможности для преодоления этих проблем и повышения эффективности, рентабельности и устойчивости цепочек поставок древесины. Однако, отметим некоторые важные особенности проведенного обзора литературы:

1. В научной литературе слабо освещены проблемы управления цепочками поставок сырья в условиях неопределенности и рисков, а именно с товарно-сырьевых бирж. В основном сырьевые сделки сейчас происходят в формате B2B между делянами (продавец) и предприятием переработчиком (покупатель) напрямую. Зачастую на налаживание таких связей между покупателем и продавцом уходят годы, что сужает потенциальное количество клиентов и сказывается на финальных ценах на сырье, а также страдает национальный бюджет, который недополучает налоговых отчислений. Использование инструментов товарно-сырьевых бирж обеспечит прозрачность совершенных сделок, с одной стороны, а с другой, приведет к увеличению числа возможных клиентов у продавца, так как предприятиям даже иностранным, нуждающимся в сырье, не придется напрямую налаживать связи с продавцом, что суммарно отразится на ценах – они станут более конкурентными и, как следствие, приведет к более эффективной реализации сырья.

2. Основным отличием сырья лесопромышленной отрасли является изменение рабочего объема древесины, который уменьшается по мере его транспортировки до покупателя. Эта особенность получила незначительную разработку в научной литературе и требует учета при формировании производственного плана и цепочек поставок сырья до склада предприятия.

Цель и задачи моделирования. Рассмотрим процессы функционирования предприятия. Наиболее важными для лесопромышленного производства являются: формирование цепочек поставок сырья и объемы производства товаров.

Для определенности необходимо отметить источники поступления сырья на биржу. Биржа заключает договоры с арендаторами делян из регионов о том, что они могут пользоваться площадкой для торгов.

После совершения сделки между предприятием по переработке сырья (лесопромышленным комплексом – заказчиком) и деляной (продавцом) заявленный в договоре объем сырья отправляется заказчику. Выкупить лот на бирже можно лишь целиком [4]. В договоре купли-продажи указываются способы и цена доставки древесины. Доставка может осуществляться силами предприятия, однако далее мы будем рассматривать доставку сырья силами поставщика.

Как правило, предприятия получают заявки от заказчиков заблаговременно. В связи с этим представляется возможным сделать предположение о том, что для планирования своей деятельность предприятие может применять большие горизонты планирования. Здесь следует отметить, что спрос на товары лесопромышленной отрасли имеет сезонный характер, что усложняет планирование деятельности компании [4].

Введем допущение и понятие эпизода. Эпизод – это такой период в заданном году, в течение которого происходит решение текущей задачи. Будем считать, что ситуация на рынке не меняется со сменой эпизодов по мере рассмотрения различных данных за заданный год. Под «не меняется» будем понимать, что, во-первых, не меняется природа входных данных (стоимости и количества заявок, распределения случайных величин, задающих пройденное расстояние по ЖД) и на все полученные оптимальные решения, найденные за предыдущие эпизоды, во-вторых, как следствие первого, что можно опираться на оптимальные траектории прибыли, найденные за предыдущие эпизоды, при построении решения на текущий горизонт планирования.

Цель настоящего исследования заключается в разработке математической модели, которая позволяет принимать решения по формированию цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях неопределенности предложения и внешних факторов каждый день и отличающуюся тем, что позволяет учитывать изменение рабочего объема сырья, которое происходит ввиду внешних факторов (температура, насекомые и др.), и вероятное время доставки до склада с опорой на траекторию прибыли за предыдущие периоды.

Задачи исследования:

1. построение экономико-математической модели;
2. составление алгоритма поиска решения для модели из п.1;
3. анализ результатов тестирования модели.

Сформулируем гипотезу исследования. Известно, что такую задачу можно решить оптимально, когда уже известны все величины, которые были разыграны (лоты, время в пути). Однако нет понимания, а можно ли принимать решения каждый день по формированию цепочек поставок сырья и об объемах производства так, чтобы значение

прибыли было максимально близко к оптимальному. Выдвинем предположение, что такая модель, которая позволяет решать задачу максимально близко к оптимальному, существует, где решения принимаются каждый день имея лишь данные текущего дня и множество предположений о том, какая ситуация будет «завтра» с опорой на оптимальные решения за предыдущие эпизоды.

Математическая модель. Любое производство, в том числе лесопромышленное, не способно функционировать без наличия источника сырья. Для обеспечения поставок необходимого объема сырья требуется определить деляны и регионы закупа и отправки. Для этого воспользуемся услугами Санкт-Петербургской Международной Товарно-сырьевой Биржи (СПбМТСБ) (https://spimex.com/). На бирже каждый день публикуются данные о том, сколько сделок (заявок) было совершено, по какой цене и какой объем сырья был продан. Кроме того, биржа оказывает услуги по доставке сырья до потребителя, что также включается в цену товару. На бирже представлены многие регионы, откуда потенциально может поступать сырье [3,4]. Однако входные данные для решения задачи будем изменять или расширять, чтобы затруднить поиск решения моделью.

После поступления достаточного объема сырья на склад производства предприятие должно принять решение об оптимальном векторе производства конечной продукции, с ориентацией на максимально возможный объем производства [3,4].

Рассмотрим схему закупа сырья и расчёт объемов производства. Широко известно, что максимизация прибыли на предприятии достигается тогда и только тогда, когда в единой модели происходит расчёт необходимых величин, то есть в модели учитывается одновременно и объем производства, и поток сырья. Поскольку предприятие обычно не знает, что будет завтра на рынке (бирже), то оно принимает решение только сегодня с опорой на расчётную ситуацию на предприятии о «завтра».

Отсюда возникает вопрос о том, какой срок планирования $\tilde{T} \geq 1$ выбрать. В этой работе будем его задавать одним значением для решения всей задачи.

Введем некоторое предположение. Пусть, во-первых, предприятию за некоторое значение E периодов известно, какие были лоты на бирже разыграны и ситуация на ЖД, во-вторых, предположим, что ситуация на рынке сырья не сильно меняется с годами, тогда предприятие, исходя из этих данных при наличии информации на своем предприятии за эти же периоды может построить модель для поиска оптимального решения. Тогда можно получить множество оптимальных траекторий значений прибыли и объемов сырья на складе каждый день на всем горизонте планирования. В данной работе сосредоточимся на рассмотрении траектории значения прибыли.

В этом случае можно построить регрессию, которая бы отражала среднее ожидаемое значение прибыли $\tilde{\pi}_m$ в каждый отдельный день m на всем горизонте планирования в M дней в зависимости от того какие лоты сегодня доступны.

Поскольку решение предстоит искать на некотором интервале $\left[m, min\left(M, m+\tilde{T}\right)\right]$, а значение ожидаемого текущего объема прибыли известно лишь на текущий день m, то возникает вопрос о том, какой объем сырья на складе предприятие ожидает в следующие дни $\left[m+1, min\left(M, m+\tilde{T}\right)\right]$, где $m+1 \neq M$.

Вернемся к найденным оптимальным траекториям объема прибыли в предыдущие E периоды. Отсюда можно рассчитать значение

$$\tau(m) = \frac{1}{E}\sum_{e=1}^{E}\frac{\pi_m(e)}{\pi_{m-1}(e)},$$

где $\pi_m(e)$ — это оптимальный объем прибыли в день m для каждой отдельной выборки входных данных $e \in E$. Тогда будем осуществлять поиск такого решения текущей задачи, которое бы принимало во внимание прогнозное значение $\tilde{\pi}_m$ в текущий день m и некоторую корректировку на весь период планирования $min\left(M-m, \tilde{T}\right)$ вперед

$$\prod_{\underline{t}=1}^{t}\tau\left(m-1+\underline{t}\right),\ t \in \left(1, \tilde{T}\right),$$

Введем набор параметров и переменных.

Параметры:

p_{km} — цена на товар типа k в день m;

c_{ilrm} — цена лота i с типом сырья l из региона r, появившаяся на бирже в день m;

A_{lk} — норма потребления сырья типа l на производство единицы товара типа k;

$\gamma_{\tilde{m}m}$ — коэффициент порчи сырья, купленного в день $\tilde{m}$ ко дню m ($m \geq \tilde{m}$);

V_{ilrm} — объем сырья в лоте i с типом сырья l из региона r, появившаяся на бирже в день m;

H_{km} — максимальный объем производства товаров типа k в день m;

$\underline{b}$ — неприкосновенный уровень запаса сырья;

$\overline{b}$ — максимальная вместимость склада;

B_0 — начальный бюджет;

FC — постоянные издержки;

M — горизонт планирования;

L_r — расстояние от склада до региона r;

S_m — расстояние, пройденное заявкой в день m;

π_m — значение прибыли на момент день m;

β — константа;

$\varepsilon^{(1)}$ — шум;

left и *right* — минимальное и максимальное значение случайной величины, распределенной по равномерному закону;

$LN(a_m, \delta_m)$ — логнормальное распределение случайной величины с параметрами (α_m, δ_m) соответственно;

$\tilde{T}$ — период, на который предприятие решает задачу $F_m^{(1,2)}$ (дни);

E — число различных наборов входных параметров

$$\{V_{ilrm}(e), c_{ilrm}(e), T_{r\tilde{m}}(e)\}.$$

Рассмотрим обозначение с тильдой над параметром и без. Будем считать, что значение с тильдой над переменной — это значение, которое оценивает предприятие, а без тильды, как оно происходит в реальности. Так, например,

$T_{r\tilde{m}}$ — время, за которое выкупленный в день $\tilde{m}$ лот из региона r дойдет до склада;

$\tilde{T}_{r\tilde{m}}$ — время, за которое по оценке предприятия лот, выкупленный в день $\tilde{m}$ лот из региона r, дойдет до склада.

Переменные:

χ_{km} — объем производства товаров типа k в день m;

λ_{ilrm} — решение о покупке лота i с типом сырья l из региона r, появившаяся на бирже в день m;

b_{lm} — уровень запаса сырья типа l на складе в день m;

$b_{lm}(e)$ — значение запаса сырья типа l в день m, которое было найдено при решении задачи на данных e.

Задача $F_m^{(1,3)}$ имеет вид (1) — (18). Опишем ее подробно.

В этой задаче рассматривается следующая целевая функция

$$\sum_{t=1}^{\tilde{T}} \left(\sum_k p_{k(m+t-1)} x_{k(m+t-1)} - \sum_{j=1}^{2} N^{(j)} \varepsilon_{m+t-1}^{(j)} \right) - \sum_{i,l,r} c_{imrl} \lambda_{imrl} \to max\,. \qquad (1)$$

Эта целевая функция направлена на максимизацию значений прибыли в каждый день $m+t-1$. В целевой функции происходит суммирование суммарной прибыли за период $[m+t-1, m+\tilde{T}-1]$.

Уравнение

$$0 = b_{l(m+t-1)} - b_{l(m+t-2)} + \sum_k A_{lk} x_{k(m+t-1)} - \tilde{\gamma}_{\tilde{m}(m+t-1)} \sum_{i,r} V_{i\tilde{m}rl} \lambda_{i\tilde{m}rl} \qquad (2)$$

— задает взаимоотношение между объемами сырья на складе, объемом потраченного на производстве сырья и объемами сырья, которые дошли до склада с некоторой потерей в объеме.

Следующая группа соотношений

$$t = 1 : \tilde{T},\ \tilde{T} = const,\ \tilde{T} \geq \max\left(\tilde{T}_{r\tilde{m}}\right),$$

$$N^{(j)} \gg 1,\ b_{l(m-1)} = const,\ \tilde{T} = \min\left(\tilde{T}, M - m + 1\right), \qquad (3)$$

$$\tilde{m} + \tilde{T}_{r\tilde{m}} = m + t - 1,$$

$$x_{km} \in N,$$

$$\lambda_{i\tilde{m}rl} = \begin{cases} const, \tilde{m} \leq m \\ \{0;1\}, \begin{cases} \tilde{m} = m \\ \tilde{T}_{r\tilde{m}} = t - 1 \end{cases} \end{cases} \qquad (4)$$

— задает возможные значения переменных.

Соотношение

$$\pi_{m+t-1} = \begin{cases} \tilde{\pi}_m\left(\{V_{imrl}\}_{i,r,l}, \{c_{imrl}\}_{i,r,l}, m\right), t = 1 \\ \prod_{\underline{t}=1}^{t} \tau\left(m - 1 + \underline{t}\right) * \tilde{\pi}_m\left(\{V_{imrl}\}_{i,r,l}, \{c_{imrl}\}_{i,r,l}, m\right), t \in \left(1, \tilde{T}\right) \\ 0, t = \tilde{T} = M - m + 1 \end{cases} \qquad (5)$$

направлено на то, чтобы поиск решения происходил с опорой на целевой уровень прибыли, который был вычислен за предыдущие периоды и являются оптимальными, здесь

$$\tilde{\pi}_m = \tilde{\pi}_m\left(\{V_{imrl}\}_{i,r,l}, \{c_{imrl}\}_{i,r,l}, m\right),$$

$$\tilde{T}(m) = \frac{1}{E} \sum_{e=1}^{E} \frac{\pi_m(e)}{\pi_{m-1}(e)}.$$

В этих соотношениях происходит усреднение оптимальных значений прибыли за аналогичные периоды и вводится допущение, что на рынке с годами не меняется природа выставляемых на продажу заявок на бирже.

Уравнение

$$\sum_{\underline{t}=1}^{t}\sum_{k} p_{k(m+\underline{t}-1)} x_{k(m+\underline{t}-1)} - \sum_{i,l,r} c_{imrl}\lambda_{imrl} + \sum_{j=1}^{2}(-1)^{j}\,\varepsilon_{m+t-1}^{(j)} = \\ = \pi_{m+t-1} - \pi_{m-1} + FC*t \tag{6}$$

— задает соотношение показателя прибыли и других переменных для каждого отдельного значения времени $m+t-1$.

Уравнение

$$\pi_{m-1} + \sum_{\underline{t}=1}^{t}\sum_{k} p_{k(m+\underline{t}-1)} x_{k(m+\underline{t}-1)} - \sum_{i,l,r} c_{imrl}\lambda_{imrl} - FC*t \geq 0 \tag{7}$$

— отражает плановые значения бюджета предприятия на момент дня m на срок $[m, \min(m+t-1, M)]$, где $\pi_0 = B_0$.

Условие

$$\sum_{l} b_{l(m+t)} \leq \bar{b} \tag{8}$$

— призвано не допустить ситуации, чтобы объем сырья на складе превышал показатель максимальной вместимости.

Целевая функция с ограничением

$$\tilde{T}_{r\tilde{m}} = m^{*} : \begin{cases} \left| L_r - \sum_{\underline{m}=\tilde{m}}^{m^{*}} S_{\underline{m}} \right| \to min \\ L_r - \sum_{\underline{m}=\tilde{m}}^{m^{*}} S_{\underline{m}} \leq 0 \end{cases} \tag{9}$$

где

$$S_{(m+t-1)} \sim LN\left(\tilde{a}_{(m+t-1)}, \tilde{\delta}_{(m+t-1)}\right) \tag{10}$$

— это система, разыгранные значения в соответствии с которой отражают максимальное время в пути лота. Так как зимой пропускная способность ниже, а летом выше, то видится нам логнормальное распределение величины $S_{(m+t-1)}$ достаточно обоснованным.

Группа соотношений

$$\tilde{\gamma}_{\tilde{m}(m+t-1)} = \min\left(1; \max\left[0; 1 - \frac{2}{\pi} arctg\left(\tilde{\beta}\left(\left(m+t-1\right) - \tilde{m}\right)\right) + \tilde{\varepsilon}^{(3)}\right]\right), \tag{11}$$

$$\tilde{\varepsilon}^{(3)} \sim U\left(left, right\right) \tag{12}$$

— задает оценку коэффициента полезного объема сырья, которое дойдет до склада, а условия:

$$0 \leq x_{k(m+t-1)} \leq H_{k(m+t-1)}, \tag{13}$$

$$\varepsilon_{m+t-1}^{(j)}, b_{l(m+t)} \geq 0,\ j = 1:2 \tag{14}$$

— ограничивают значения некоторых переменных.

Пересчет основных показателей происходит после найденного решения для дня m (15–17):

$$\pi_m = \pi_{m-1} + \sum_k p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r} c_{imrl} \lambda_{imrl} - FC, \tag{15}$$

$$\gamma_{\tilde{m}(m+t-1)} = \min\left(1; \max\left[0; 1 - \frac{2}{\pi} arctg\left(\beta\left(\left(m+t-1\right) - \tilde{m}\right)\right) + \varepsilon^{(3)}\right]\right), \tag{16}$$

$$b_{lm} = b_{lm-1} - \sum_k A_{lk} x_{km} + \gamma_{\tilde{m}m}\left(\sum_{i,r} V_{i\tilde{m}rl} \lambda_{i\tilde{m}rl}\right), \tag{17}$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{m} &= m - T_{r\tilde{m}}, \\ m &= m + 1. \end{aligned} \tag{18}$$

В равенстве (18) знак равно используется в качестве оператора присваивания значению слева от знака равно значению справа.

Исходные данные для численного моделирования. Апробация модели была проведена, с одной стороны, на данных биржи, с другой стороны, на данных предприятия, расположенного в Приморском крае.

Данные биржи использовались при генерации значений параметров, связанных с лотами $\left(c_{imrl}, V_{i\tilde{m}rl}\right)$, а данные предприятия для оценки параметров логистики и производственных процессов

$$\left(\bar{b}, \underline{b}, B_0, FC, a_m, \delta_m, \beta, L_r\right).$$

Для определенности будем использовать $K = 4$ типов товаров, горизонт планирования длиною в $M = 100$ дней, типов сырья $L = 2$, количество регионов $R = 4$, количество лотов каждый день в диапазон $0 \leq I \leq 6$, количество различных наборов входных параметров $E = 400$. Биржа представлена четырьмя регионами: Иркутская область ($r = 1$), Пермский край ($r = 2$), Республика Бурятия ($r = 3$), Московская область ($r = 4$). Горизонт планирования лежит в интервале между 1 февраля 2022 года и серединой мая 2022 года.

Основные входные данные, характеризующие предприятие, представлены в таблицах 1 – 2.

Для проведения вычислений воспользуемся высокоуровневым языком программирования Matlab и встроенной функцией intlinprog [20] для поиска решений задач смешано-целочисленной линейной оптимизации.

Таблица 1

Основные входные параметры предприятия

$\forall m>0:\ p_{km}, k=1:\ K$, руб	$(1;1,5;1,6;1,7)\cdot 10^4$
$\overline{b}$, м^3	300
$\underline{b}$, м^3	20
B_0, руб	$3\cdot 10^6$
$left(m)$, у.е.	$-\frac{100}{m\cdot 10^5}$
$right(m)$, у.е.	$\frac{100}{m\cdot 10^5}$
$\forall m,k>0:\ H_{km}$	4
$L_r, r=1:\ R$, км	$(3740;7560;3250;9000)$

Источники: предприятие, биржа, авторы.

Таблица 2

Затраты сырья на производство единицы товара

A_{lk}	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$
$l=1$	2	3	4	3
$l=2$	1	3	3	5

Источники: предприятие.

Обсуждение результатов численного моделирования. Рассмотрим, как изменялся объем сырья на складе (рис. 1 – 2). На них видно, что поведения сырья на складе в среднем стабильно в отличии от результатов поиска оптимального решения, которое представлено в работе [3]. «Серый фон» на графике показывают, что разброс показателей запаса объемов сырья на складе достаточно большой.

Отдельный интерес представляет собой оценка объемов сырья, которые дошли до склада. Для этого рассмотрим рисунки 3–6.

На рисунках 3 – 4 изображены точками рабочие объемы сырья лотом, которые дошли до склада. Из этих рисунков видно, что ниже отметки 315–325 м^3 лоты на склад не приходили, если рассматривать оба типа сырья. Кроме того, несмотря на то, что в оптимуме [3] ведется закупка сырья обоих типов из регионов 2 и 4, результаты текущей работы не выявили такую потребность при ежедневном принятии решений, что отражается на поведении прибыли. При оценке средних показателей пришедшего сырья (оба типа) на склад также можно заметить незначительный разброс.

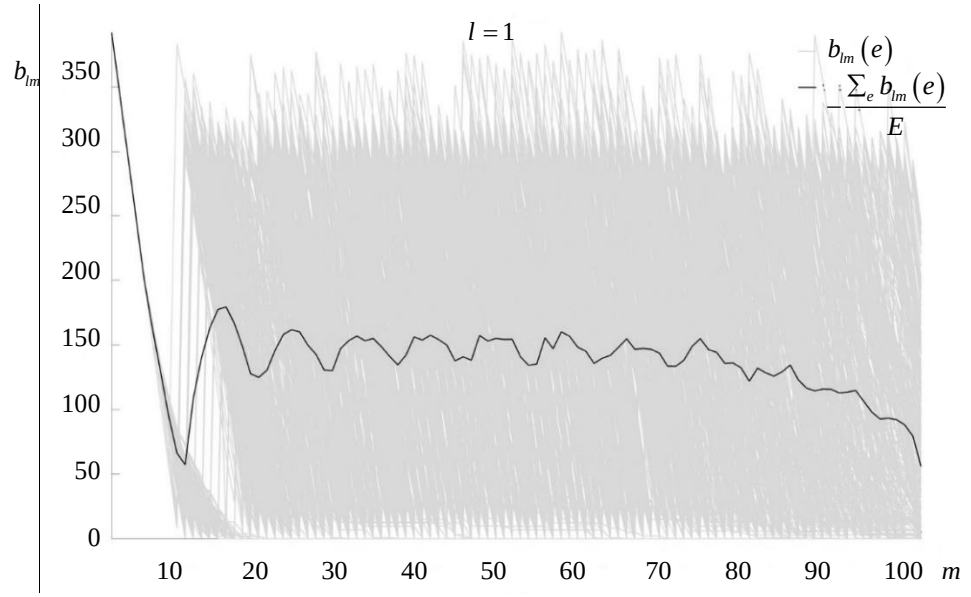


Рис. 1. Визуализация поведения траектории запасов сырья типа $l=1$ на складе на всем горизонте планирования

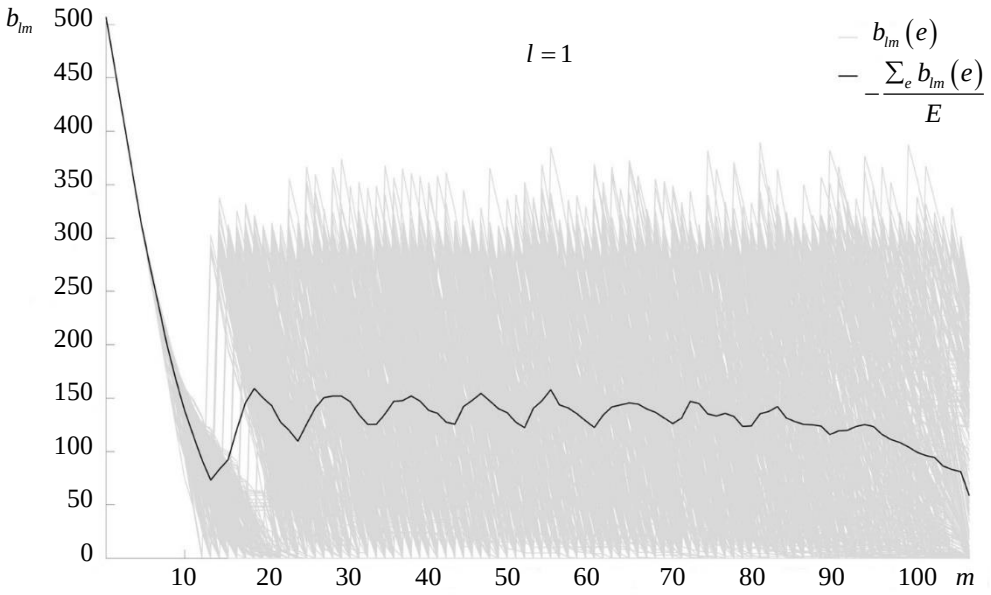


Рис. 2. Визуализация поведения траектории запасов сырья типа $l=2$ на складе на всем горизонте планирования

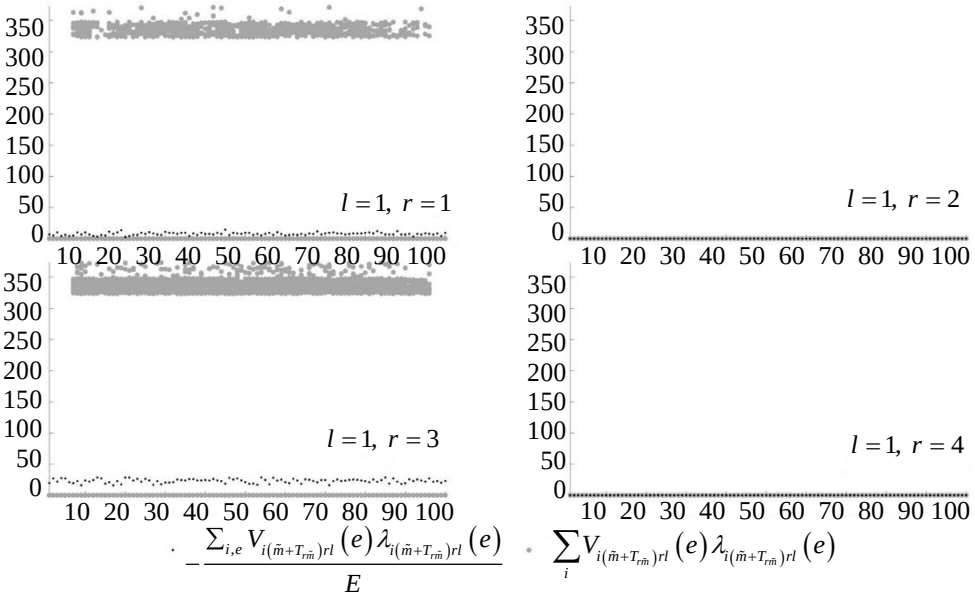


Рис. 3. Визуализация объемов сырья $l = 1$ дошедших до склада

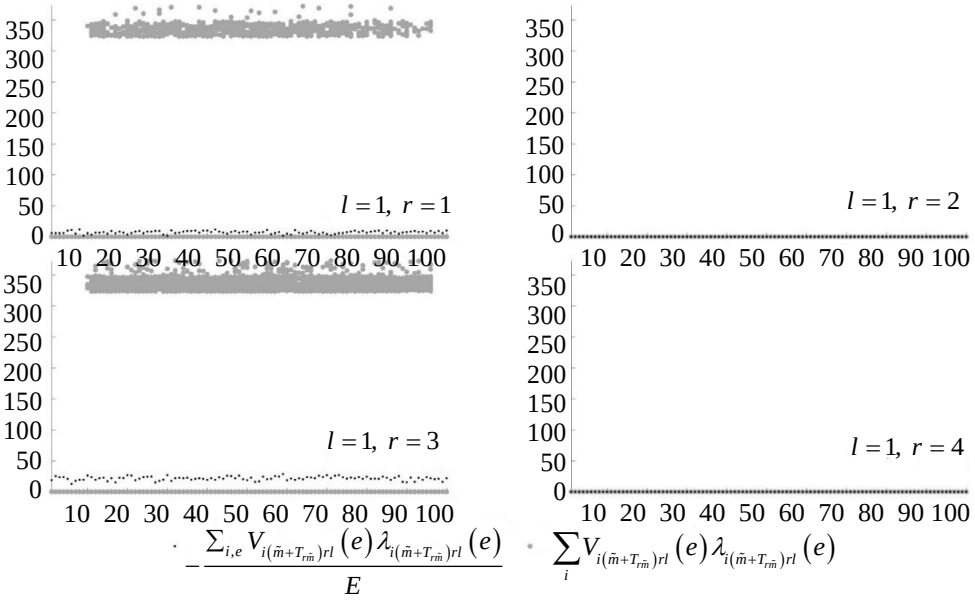


Рис. 4. Визуализация объемов сырья $l = 2$ дошедших до склада

Рассмотрим рисунки 5 – 6. Из них следует, что несмотря на формирования цепочек поставок из двух регионов, выделяется тренд на наличие двух вариантов того, в каком полезном объеме лоты дойдут до склада — 0,8 или 0,87.

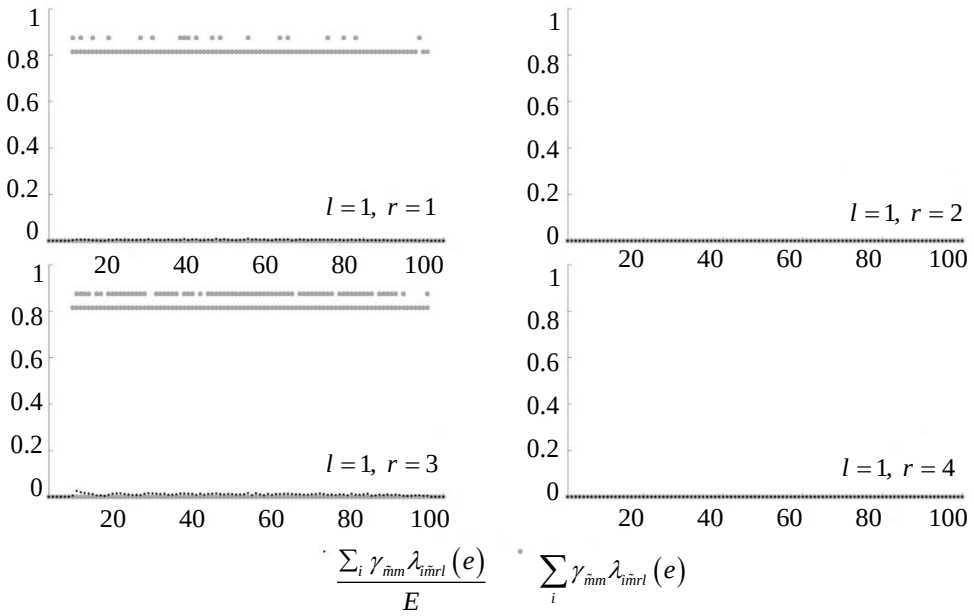


Рис. 5. Визуализация степени полезности дошедшего объема сырья $l = 1$ до склада

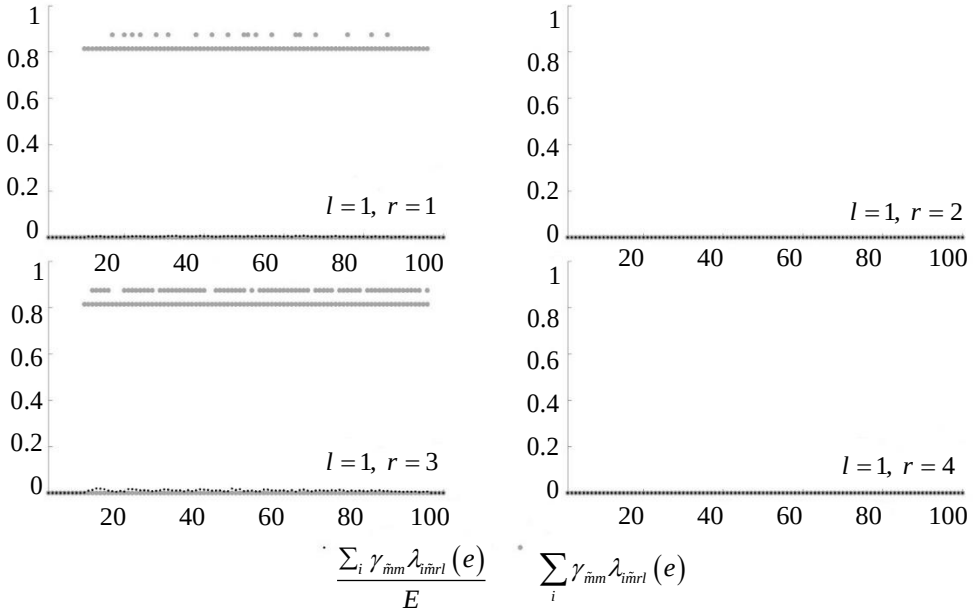


Рис. 6. Визуализация степени полезности дошедшего объема сырья $l = 2$ до склада

Следующим важным фактором, который стоит рассмотреть – это количество закупаемых лотов с биржи в каждый день m. Для этого приведены ниже рисунки 7 – 8. По оси Оу отложены значения $[\omega_1, \omega_2]$, где ω_1 отражает количество заявок, а ω_2 показывает частоту закупа

ω_1 заявок. Точками обозначен факт закупа ω_1 заявок в соответствующий день m. Из рисунков следует, что в основном ведется закуп по 1 лоту каждый день. В остальном же рисунки подтверждают вышеизложенные рассуждения.

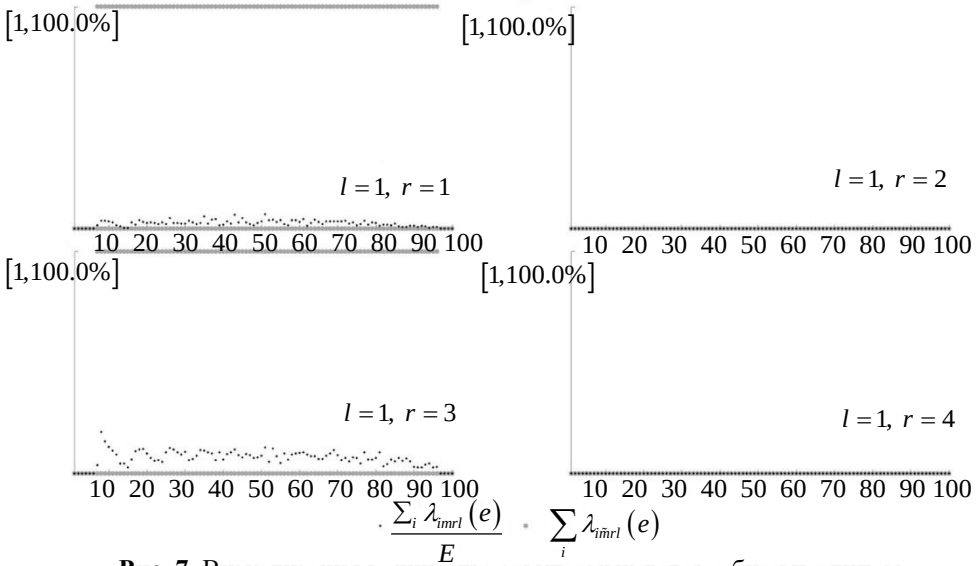


Рис. 7. Визуализация количества закупаемых лотов с биржи с типом сырья $l = 1$

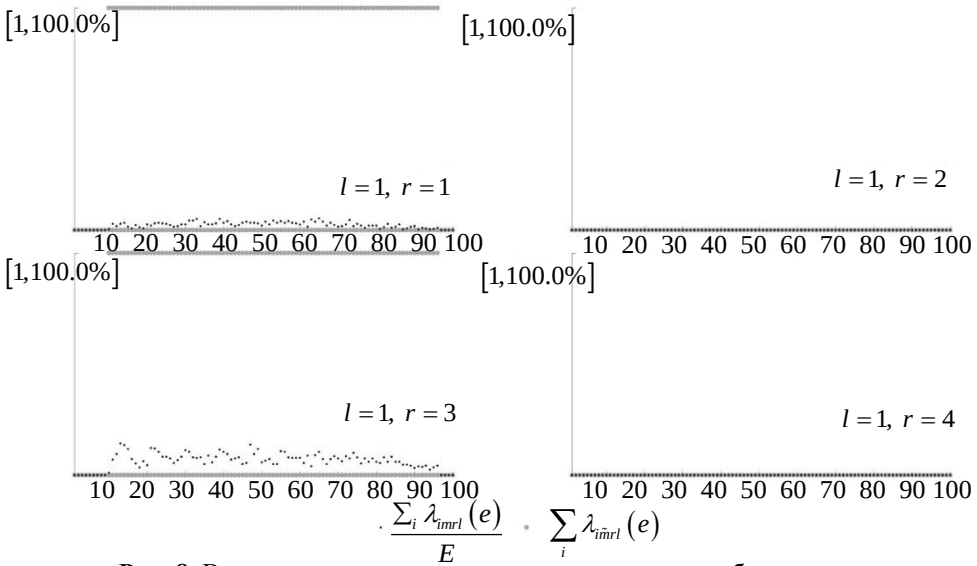


Рис. 8. Визуализация количества закупаемых лотов с биржи с типом сырья $l = 2$

На рисунке 9 изображены объемы производства товаров. Стоит отметить, что объемы производства нестабильны – это зависит от объема сырья на складе. При поиске оптимального решения в работе [2] показано, что объемы производства всегда равны 4, однако из графика

9 видно, что не всегда в среднем производство достигает оптимальных значений.

Наиболее важным показателем остается значение прибыли на всем горизонте планирования. Для оценки траектории прибыли рассмотрим рисунок 10. Обозначим через $opt(e)$ — оптимальное значение прибыли в день m для выборки данных e.

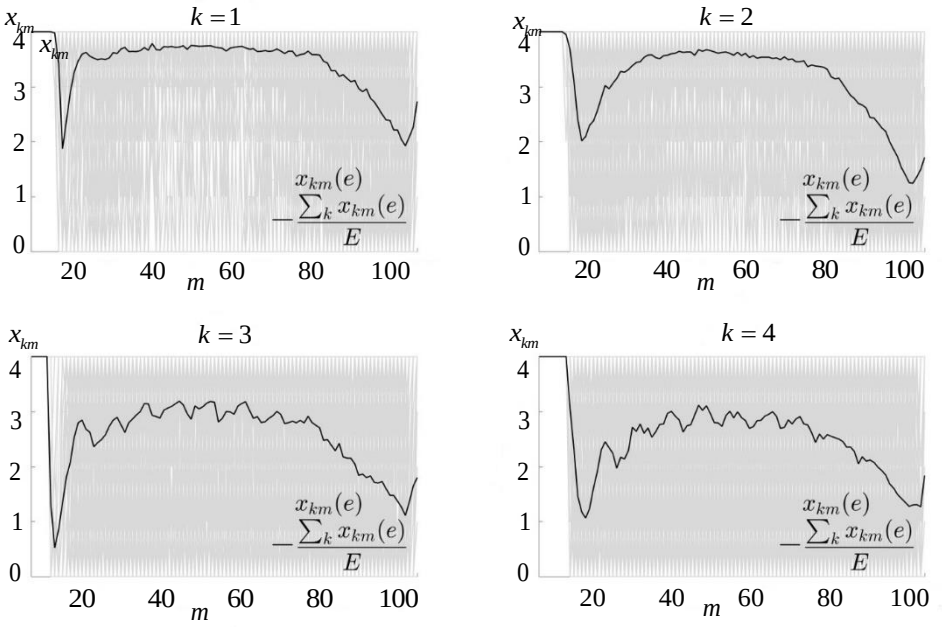


Рис. 9. Визуализация объемов производства товаров по каждому типу

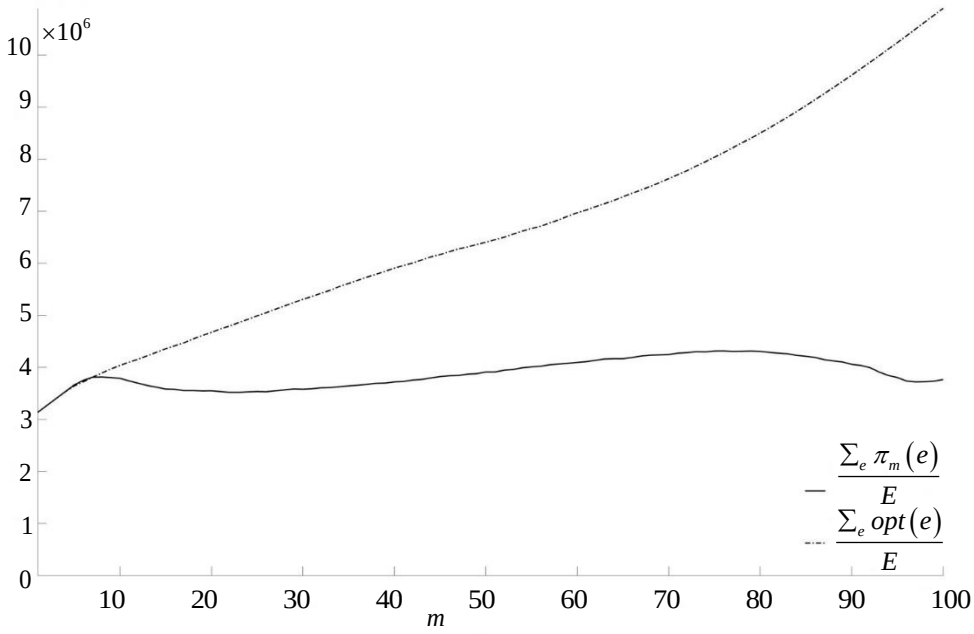


Рис. 10. Визуализация поведения траектории средних значений объемов прибыли на всем горизонте планирования

Наиболее важным показателем остается значение прибыли на всем горизонте планирования. Для оценки траектории прибыли рассмотрим рисунок 10. Обозначим через $opt(e)$ — оптимальное значение прибыли в день m для выборки данных e.

Поведение средних значений объемов прибыли показывает, что доля отклонения от оптимального решения значительна в конце горизонта планирования. Поведение прибыли изменяется стабильно.

Рассмотрим положительные, отрицательные стороны и направления для дальнейшего развития текущей модели. К положительным сторонам модели можно отнести:

1. Концептуальную простоту исследования в части моделирования — методы оптимизации линейных задач получили серьезную проработку в науке;

2. Учитывает множество важных аспектов лесопромышленной отрасли, например, полезный объем сырья, который будет зачислен на склад, время лота в пути;

3. Позволяет принимать решение в каждый день планирования, что соответствует тому, как в реальности происходит процесс планирования производства и формирования цепочек поставок сырья;

4. Данная модель может включать в себя и другие процессы лесопромышленного комплекса такие, как логистика, проблему раскроя и другие;

5. Как следует из работы [4], необходимо учитывать изменение пропускной способности ЖД при формировании цепочек поставок, данная работа учитывает эту особенность (ограничения (9 – 10));

6. Поведение значений сырья на складе более предсказуемые и стабильные, чем при оптимальном, но при этом происходит расплата в области значения прибыли.

К отрицательным сторонам исследования можно отнести следующие пункты:

1. Достоверно неизвестна природа значения β при расчете полезного объема сырья, который дойдет до склада. Вполне может так быть, что β — это не параметр, а некоторая функция, зависимая от времени или от других факторов;

2. В работе не рассматривается важный фактор процесса расчёта стоимости товаров в каждый отдельный день или период на всем горизонте планирования;

3. Важным фактором, который может сильно повлиять на прибыль — логистика готовых товаров до пунктов потребления, не рассмотрен в работе, однако, указано, что модель можно модифицировать до состояния, когда она будет включать эту подзадачу;

4. Ключевым фактором экономики всегда являлся спрос. В данной работе не отражено влияние спроса на производство товаров;

5. Лесопромышленные предприятия часто закупают сырье в формате B2B. Было бы полезным в качестве диверсификации риска цепочек поставок сырья использовать также этот инструмент;

6. Зачастую решения могут быть носить разные меры риска. Это позволяет при грамотном подходе получать большее значение прибыли. Было бы полезно модифицировать модель так, чтобы лицо принимающее решение имело возможность при заданном уровне риска формировать цепочки поставок сырья;

7. Оценку параметров $(\tilde{a}_m, \tilde{\delta}_m)$, отвечающих за расчёт расстояния, пройденного лотами следует рассчитывать не исходя из опыта работы предприятия (так существует высокая вероятность допустить ошибку в планировании), а математическими методам, например, нейронными сетями;

8. 2021 и 2022 года показали, насколько важно уметь формировать и перестраивает цепочки поставок, включая сырьевые, под воздействием влияния «черных лебедей» (Black Swan Theory) и/или «носорогов» («Rhino problem»), в данной работе не представлены какие-либо рассуждения по этому поводу.

Не ясно, как будет работать модель в случае, если качество оценки суммарного объема запаса сырья на складе ($\tilde{b}_m\left(\{V_{imrl}\}_{i,r}, \{c_{imrl}\}_{i,r}, m\right)$) и $\tau(m)$) будет низкой, и будет ли в этой ситуации модель показывать такие же результаты.

Заключение. В работе рассмотрена модель, посвящённая проблеме оптимального управления производства лесопромышленного предприятия в вопросах расчёта объемов производства и формирования цепочек поставок сырья в условиях неопределенности. Модель позволяет максимизировать значение доналоговой прибыли и представляет собой многопериодную задачу линейного программирования, отличающуюся возможностью принимать решения одно временно по обоим рассматриваемым вопросам: расчёт объемов производства и формирование цепочек поставок. Результаты реализации модели включают структуру производства и последовательность закупа лотов с товарно-сырьевой биржи, а также дату последних поступления на склад. Многопериодность достигается разбиением задачи на множество более мелких для ее решения в каждый отдельный день подобно тому, как это и происходит на предприятиях.

Процесс поиска решения представляет собой последовательный процесс решения задач линейного программирования по принятию решения об объемах производства и формирования цепочек поставок в каждый день. Каждый день предприятие принимает решение исходя

из оценок того, когда товар придет на склад и в каком объеме, где последний уменьшается в процессе доставки под давлением внешних механических факторов. Для достижения близости решения к оптимальному принято решение рассчитать регрессию зависимости целевого значения прибыли в каждый отдельный день от значений текущих доступных лотов и номера дня. Однако, для планирования наперед была рассчитана еще одна регрессия, которая позволяет оценить зависимость коэффициента изменения траектории прибыли от номера дня. Все регрессии рассчитывались на данных оптимальных траекторий прибыли, которые были получены путем использования одной из известных моделей поиска оптимального решения текущей задачи комплексно на всем горизонте планирования, которая принимала все необходимые разыгранные значения за предыдущий период.

Апробация разработанной методики поиска решения проведена на примере лесопромышленного предприятия Приморского края. На основе проведенных расчетов и найденного решения сформулированы рекомендации компании по сотрудничеству с товарно-сырьевой биржей России. Анализ решения показал, что, несмотря на территориальную близость Иркутской области к Приморскому краю, стоит обратить внимание на покупку сырья из Московской области и Республики Бурятия. Это объясняется множеством причин, среди которых можно выделить наиболее важные: достаточный потенциалом в части добываемого сырья и более приемлемой ценовой политикой компаний. Проведен краткий анализ возможных объемов производства продукции каждого типа. Анализ найденного решения демонстрирует, что производство большинства типов товаров должно быть максимальным на всем горизонте планирования, однако, в силу отсутствия необходимого объема сырья на складе, это недостижимо.

Приведены положительные, отрицательные стороны модели, а также рассмотрены идеи для дальнейшего ее развития.

В целом, можно утверждать, что разработанная модель эффективна при поиске решения поставленной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Rogulin R.S. The Place of ICT and Entrepreneurship in Forming Sustainable Supply Chains. *Ekonomicheskaya Politika*, 2021, vol. 16, no. 4, pp. 84–103. DOI: 10.18288/1994-5124-2021-4-84-103.

[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. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.3.60.77.

[3] Рогулин Р.С. Математическая модель поиска оптимального решения задачи о формировании цепочек поставок сырья в условиях неопределенности с товарно-сырьевой биржи на склад предприятий лесопромышленной отрасли с

учетом производственно-логистических особенностей. *Прикладная информатика*, 2023, (в печати).

[4] Рогулин Р.С. Модель оптимизации плана закупок сырья из регионов России лесоперерабатывающим комплексом. *Бизнес-информатика*, 2020, Т. 14, № 4, с. 19–35. DOI: 10.17323/2587-814X.2020.4.19.35.

[5] Coşkun B., Yıldız M. S., Bayraktar M. Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminde tedarikçi değerlendirme kriterlerinin dematel yöntemiyle incelenmesi ve ahşap sektöründe bir uygulama. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi [International Journal of Management Economics and Business]*, 2022, Vol. 18 (2), pp. 618-648. DOI: 10.17130/ijmeb.978939.

[6] Palander T. Outsourcing Issues of Wood Supply Chain Management in the Forest Industry. *Forest Science*, 2022, vol. 68, pp. 521–532. DOI: 10.1093/forsci/fxac029.

[7] Salari S.A.-S., Mahmoudi H., Aghsami A., Jolai F., Jolai S., Yazdani M. Off-Site Construction Three-Echelon Supply Chain Management with Stochastic Constraints: A Modelling Approach. *Buildings*, 2022, vol. 12, iss. 2, article ID: 119. DOI: 10.3390/buildings12020119.

[8] Mishra M., Ghosh S. K., Sarkar B. Maintaining energy efficiencies and reducing carbon emissions under a sustainable supply chain management. *AIMS Environmental Science*, 2022, vol. 9, iss. 5, pp. 603-635. doi: 10.3934/environsci.2022036.

[9] Svatoš-Ražnjevi´c H., Orozco L., Menges A. Advanced Timber Construction Industry: A Review of 350 Multi-Storey Timber Projects from 2000–2021. Buildings, 2022, vol. 12, iss. 4, article ID: 404. DOI: 10.3390/buildings12040404.

[10] Torabzadeh S. A., Nejati E., Aghsami A., Rabbani M. A dynamic multi-objective green supply chain network design for perishable products in uncertain environments, the coffee industry case study. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 2022, vol. 17, iss. 3, pp. 220-237, DOI: 10.1080/17509653.2022.2055672.

[11] Alkahtani M. Mathematical Modelling of Inventory and Process Outsourcing for Optimization of Supply Chain Management. *Mathematics*, 2022, vol. 10, no. 7, article ID: 1142. DOI: 10.3390/ math10071142.

[12] Longo F., Mirabelli G., Solina V., Alberto U., De Paola G., Giordano L., Ziparo M. A Simulation-Based Framework for Manufacturing Design and Resilience Assessment: A Case Study in the Wood Sector. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 15, article ID: 7614. DOI: 10.3390/app12157614.

[13] Kuck T.N., Sano E.E., Bispo P.d.C., Shiguemori E.H., Silva Filho P.F.F., Matricardi E.A.T. A Comparative Assessment of Machine-Learning Techniques for Forest Degradation Caused by Selective Logging in an Amazon Region Using Multitemporal X-Band SAR Images. *Remote Sens*, 2021, vol. 13, no. 17, article ID: 3341. DOI: 10.3390/ rs13173341.

[14] El-Gawad A. F. Abd, Zaki Sh., Kamal E. A Survey on Machine Learning Techniques for Supply Chain Management. *American Journal of Business and Operations Research*, 2021, vol. 2, no. 1, pp. 24-38. DOI: 10.54216/AJBOR.020103.

[15] Paul S., Ali S.M., Hasan M.A., Paul S.K., Kabir G. Critical Success Factors for Supply Chain Sustainability in the Wood Industry: An Integrated PCA-ISM Model. *Sustainability*, 2022, vol. 14, no. 3, article ID: 1863. DOI: 10.3390/ su14031863.

[16] Vitale I., Dondo R. G., González M., Cóccola M. E. Modelling and optimization of material flows in the wood pellet supply chain. *Applied Energy*, 2022, vol. 313, article ID: 118776.

[17] Khan Y., Su'ud M.B.M., Alam M.M., Ahmad S.F., Ahmad (Ayassrah) A.Y.A.B., Khan N. Application of Internet of Things (IoT) in Sustainable Supply Chain Management. *Sustainability*, 2023, vol. 15, article ID: 694. DOI: 10.3390/su15010694.

[18] Prajapati D., Chan F.T.S., Chelladurai H., Lakshay L., Pratap S. An Internet of Things Embedded Sustainable Supply Chain Management of B2B E-Commerce. *Sustainability*, 2022, vol. 14, article ID: 5066. DOI: 10.3390/su14095066.

[19] Munita A. A., Izzati T. Planning of Raw Material for Wooden Pallet using Probabilistic Inventory Model. *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology*, 2022, vol. 8, no. 4, pp. 19–27. DOI: 10.31695/IJERAT.2022.8.4.3.

[20] The MathWorks, Inc. [Electronic resource]. Access mode: https://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html (accessed: 05.07.2023).

Статья поступила в редакцию 27.03.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Рогулин Р.С. Математическая модель формирования цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях риска с опорой на траекторию прибыли за предыдущие периоды. *Математическое моделирование и численные методы,* 2023, № 2, с. 131–156.

Рогулин Родион Сергеевич — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Математика и моделирование» ФГБОУ ВО «ВВГУ». e-mail: rafassiaofusa@mail.ru

Mathematical model for the formation of supply chains of raw materials from the commodity exchange under risk based on the profit trajectory for previous periods redundancy

© R.S. Rogulin

Vladivostok State University, Vladivostok, 690000, Russia

The formation of the supply chain of raw materials is closely related to the production problems of woodworking enterprises. Construction of supply chains for raw materials and the optimal calculation of daily production have been hot topics since the beginning of the second industrial revolution. This article discusses the enterprise of the Primorsky Territory of the woodworking industry, which does not have plots for rent. The purpose of the work is to solve the problem of building a supply chain of raw materials, taking into account the daily loading of production facilities and finding the optimal solution. The source of raw materials is the commodity exchange, where lots appear daily randomly in different mining regions. In the scientific literature, there are many ways to calculate the best profit value, taking into account many restrictions, but they do not take into account many features that are important for woodworking enterprises. Based on a review of the scientific literature, this article presents a mathematical model that acts as a decision-making mechanism on each individual day, and it differs in that it can take into account the coefficient of useful volume of raw materials that will reach the warehouse and travel time. The model was tested on the data of the Russian Commodity and Raw Materials Exchange and a company in Primorsky Krai. The result of testing the model is the calculated optimal profit trajectory for each set of data on the volume of raw materials, the time

of lots in transit, as well as many important indicators for any production: profit volume, production volume of goods. The analysis of the received solutions showed that there are difficulties in planning supply chains and production volumes. The regions are analyzed as sources of raw materials, from which regions and when it is worth buying raw materials. The shortcomings and positive aspects of the mathematical model are given.

***Keywords**: production optimization, transport task, timber industry, commodity exchange, supply chains, output*

REFERENCES

[1] Rogulin R.S. The Place of ICT and Entrepreneurship in Forming Sustainable Supply Chains. *Ekonomicheskaya Politika*, 2021, vol. 16, no. 4, pp. 84–103. DOI: 10.18288/1994-5124-2021-4-84-103.

[2] Rogulin R.S. Mathematical model for the formation of pricing policy and plan for the production and transport system of a timber industry enterprise. *Business-Informatics*, 2021, vol. 15, no. 3, pp. 60–77. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.3.60.77.

[3] Rogulin R.S. A mathematical model for finding the optimal solution to the problem of forming supply chains of raw materials under conditions of uncertainty from the commodity exchange to the warehouse of timber industry enterprises, taking into account production and logistics features. *Journal of applied informatics*, 2023, (in press).

[4] Rogulin R.S. A model for optimizing the plan for purchasing raw materials from the regions of Russia by a timber processing complex. *Business-Informatics*, 2020, vol. 14, no. 4, pp. 19–35. DOI: 10.17323/2587-814X.2020.4.19.35.

[5] Coşkun B., Yıldız M. S., Bayraktar M. Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetiminde tedarikçi değerlendirme kriterlerinin dematel yöntemiyle incelenmesi ve ahşap sektöründe bir uygulama. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi [International Journal of Management Economics and Business]*, 2022, Vol. 18 (2), pp. 618-648. DOI: 10.17130/ijmeb.978939.

[6] Palander T. Outsourcing Issues of Wood Supply Chain Management in the Forest Industry. *Forest Science*, 2022, vol. 68, pp. 521–532. DOI: 10.1093/forsci/fxac029.

[7] Salari S.A.-S., Mahmoudi H., Aghsami A., Jolai F., Jolai S., Yazdani M. Off-Site Construction Three-Echelon Supply Chain Management with Stochastic Constraints: A Modelling Approach. *Buildings*, 2022, vol. 12, iss. 2, article ID: 119. DOI: 10.3390/buildings12020119.

[8] Mishra M., Ghosh S. K., Sarkar B. Maintaining energy efficiencies and reducing carbon emissions under a sustainable supply chain management. *AIMS Environmental Science*, 2022, vol. 9, iss. 5, pp. 603-635. doi: 10.3934/environsci.2022036.

[9] Svatoš-Ražnjevi´c H., Orozco L., Menges A. Advanced Timber Construction Industry: A Review of 350 Multi-Storey Timber Projects from 2000–2021. Buildings, 2022, vol. 12, iss. 4, article ID: 404. DOI: 10.3390/buildings12040404.

[10] Torabzadeh S. A., Nejati E., Aghsami A., Rabbani M. A dynamic multi-objective green supply chain network design for perishable products in uncertain environments, the coffee industry case study. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 2022, vol. 17, iss. 3, pp. 220-237, DOI: 10.1080/17509653.2022.2055672.

[11] Alkahtani M. Mathematical Modelling of Inventory and Process Outsourcing for Optimization of Supply Chain Management. *Mathematics*, 2022, vol. 10, no. 7, article ID: 1142. DOI: 10.3390/ math10071142.

[12] Longo F., Mirabelli G., Solina V., Alberto U., De Paola G., Giordano L., Ziparo M. A Simulation-Based Framework for Manufacturing Design and Resilience Assessment: A Case Study in the Wood Sector. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 15, article ID: 7614. DOI: 10.3390/app12157614.

[13] Kuck T.N., Sano E.E., Bispo P.d.C., Shiguemori E.H., Silva Filho P.F.F., Matricardi E.A.T. A Comparative Assessment of Machine-Learning Techniques for Forest Degradation Caused by Selective Logging in an Amazon Region Using Multitemporal X-Band SAR Images. *Remote Sens*, 2021, vol. 13, no. 17, article ID: 3341. DOI: 10.3390/ rs13173341.

[14] El-Gawad A. F. Abd, Zaki Sh., Kamal E. A Survey on Machine Learning Techniques for Supply Chain Management. *American Journal of Business and Operations Research*, 2021, vol. 2, no. 1, pp. 24-38. DOI: 10.54216/AJBOR.020103.

[15] Paul S., Ali S.M., Hasan M.A., Paul S.K., Kabir G. Critical Success Factors for Supply Chain Sustainability in the Wood Industry: An Integrated PCA-ISM Model. *Sustainability*, 2022, vol. 14, no. 3, article ID: 1863. DOI: 10.3390/ su14031863.

[16] Vitale I., Dondo R. G., González M., Cóccola M. E. Modelling and optimization of material flows in the wood pellet supply chain. *Applied Energy*, 2022, vol. 313, article ID: 118776.

[17] Khan Y., Su'ud M.B.M., Alam M.M., Ahmad S.F., Ahmad (Ayassrah) A.Y.A.B., Khan N. Application of Internet of Things (IoT) in Sustainable Supply Chain Management. *Sustainability*, 2023, vol. 15, article ID: 694. DOI: 10.3390/ su15010694.

[18] Prajapati D., Chan F.T.S., Chelladurai H., Lakshay L., Pratap S. An Internet of Things Embedded Sustainable Supply Chain Management of B2B E-Commerce. *Sustainability*, 2022, vol. 14, article ID: 5066. DOI: 10.3390/su14095066.

[19] Munita A. A., Izzati T. Planning of Raw Material for Wooden Pallet using Probabilistic Inventory Model. *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology*, 2022, vol. 8, no. 4, pp. 19–27. DOI: 10.31695/IJERAT.2022.8.4.3.

[20] The MathWorks, Inc. [Electronic resource]. Access mode: https://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html (accessed: 05.07.2023).

Rogulin R.S., Cand. Sc. (Econ.), Senior Lecturer, Department of Mathematics and modeling, Vladivostok State University. e-mail: rafassiaofusa@mail.ru