

DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.41.56

Математическая модель формирования цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях неопределенности*

Р.С. Рогулин 

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

Владивостокский государственный университет
Адрес: Россия, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, д. 41Дальневосточный федеральный университет
Адрес: Россия, 690922, Приморский край, остров Русский, п. Аякс, д. 10

Аннотация

Формирование цепочек поставок сырья очень тесно связано с проблемами производства на лесоперерабатывающем предприятии. С начала второй промышленной революции актуальным стоял вопрос о формировании цепочек поставок сырья и об оптимальном расчете объемов производства для каждого отдельного дня. В данной статье рассматривается лесопромышленное предприятие, не имеющее собственных источников древесины, которое ежедневно решает задачу обеспечения поставок сырья и оптимальной загрузки производства. В качестве источника сырья рассматривается товарно-сырьевая биржа, где лоты случайно появляются каждый день в разных сырьевых регионах. В научной литературе существует множество подходов к расчету оптимального значения прибыли на всем горизонте планирования, однако они не учитывают множество важных для лесоперерабатывающего предприятия особенностей. В работе представлена математическая модель, которая представляет собой механизм принятия ежедневного решения на всем горизонте планирования, и отличающуюся тем, что позволяет учитывать долю полезного объема и время доставки сырья в условиях неопределенности. Результатом модели является оптимальная траектория прибыли, учитывающая объемы сырья, время доставки лотов, объем прибыли, объем производства товаров. Модель протестирована на данных товарно-сырьевой биржи России и одного из предприятий Приморского края. Анализ результатов показал, что существуют сложности в планировании цепочек поставок и объемов производства. Выполнена оценка оптимальности сырьевых регионов. Сформулированы достоинства и недостатки математической модели.

* Статья опубликована при поддержке Программы НИУ ВШЭ «Университетское партнерство»

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

Цитирование: Рогулин Р.С. Математическая модель формирования цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях неопределенности // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17. № 4. С. 41–56. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.41.56

Введение

Цепочка поставок древесины играет жизненно важную роль в мировой экономике, обеспечивая необходимым сырьем различные отрасли промышленности, такие как строительство [1–4], производство мебели [5–7] и бумаги [8]. Цепочки поставок сложны и динамичны, их формирование зависит от эффективности управления лесным хозяйством, процессами заготовки, переработки древесины, распределения и потребления продукции из нее. Эффективное управление цепочкой поставок (Supply Chain Management, далее SC, SCM) древесины имеет решающее значение для обеспечения устойчивости производства и сохранения ресурсов при одновременном содействии экономическому росту.

В последние годы возрос интерес к моделированию цепочки поставок древесины для оптимизации и повышения устойчивости производства [9–11]. Современные модели формирования SC разрабатываются для получения менеджментом ценной информации о производительности цепочки поставок и могут использоваться для повышения устойчивости и эффективности стратегий управления [12, 13]. Существует значительное количество исследований, область применения которых лежит в различных областях лесопромышленного производства: управление лесным хозяйством и процессами лесозаготовки, переработки, распределения и потребления.

Моделирование процессов управления цепочками поставок древесины имеет решающее значение для эффективного использования ресурсов, снижения воздействия на окружающую среду и улучшения экономических показателей. С развитием технологий при разработке моделей стали использоваться такие методы анализа данных, как машинное обучение и стохастическая оптимизация, обеспечивающие более точные прогнозы и эффективные инструменты для принятия решений.

1. Обзор литературы

Цепочка поставок древесины представляет собой сложную сеть процессов, включающую такие, как управление лесным хозяйством, заготовку, транспортировку, переработку и распределение. Эффективное управление цепочкой поставок древесины имеет решающее значение для оптимизации операций и достижения целей устойчивого развития любого предприятия лесопромышленной отрасли. Математическое моделирование является мощным инструментом поддержки процессов принятия решений и оптимизации различных аспектов управления цепочками поставок древесины. Рассмотрим опыт моделирования проблемы управления цепочками поставок.

1.1. Модели оптимизации заготовки древесины

Оптимизация процессов заготовки древесины необходима для устойчивого лесопользования и максимизации экономической отдачи. Математические модели, такие как модели смешанно-целочисленного линейного программирования (Mixed-Integer Linear Programming, далее MILP), широко применяются для определения оптимального времени и пространственного распределения лесозаготовок. В таких моделях учитываются различные факторы, включая рост древесины, рыночный спрос, эксплуатационные расходы и экологические ограничения, для поддержки процессов принятия решений. Например, в работе [9] авторы предлагают модель MILP, которая оптимизирует операции по заготовке древесины и строительству дорог в нескольких лесозаготовительных районах с учетом экономических, экологических и транспортных факторов. Модель направлена на максимизацию чистой приведенной стоимости доходов от древесины при минимизации затрат на лесозаготовку и воздействия на окружающую среду.

Эффективная логистика и транспортировка являются важнейшими компонентами цепочки поставок древесины, обеспечивая своевременную

доставку продукции из древесины и минимизируя транспортные расходы. Методы математического моделирования применяются для оптимизации транспортных маршрутов, планирования транспортных средств и управления запасами. Авторы исследования [10] разработали модель MILP для многодневной маршрутизации грузовых автомобилей. Применялась модель в бразильской лесозаготовительной компании, управляющей одной фабрикой и несколькими лесозаготовительными площадками, оборудованными кранами. Модель учитывает проблему LTL (Less Than Truckload problem), допуская многократное перемещение грузовиков между несколькими лесными пасаками. Целевая функция направлена на минимизацию транспортных расходов, количество грузовиков, количество рейсов и затраты на сверхурочные. Модель была применена к случаю с 5 доступными харвестерами и 48 грузовиками. Методы, напрямую использующие модели оптимизации, чувствительны к размерности проблемы с точки зрения количества переменных и ограничений. Кроме того, такие модели обычно требуют допущений, например, о полных грузовиках, как в работе [10], чтобы появилась возможность сформулировать математическую модель решаемой проблемы.

1.2. Модели управления запасами и цепями поставок

В литературе известны многие модели, посвященные разработке и применению различных подходов к решению множества проблем в области управления запасами/цепочками поставок. Например, применялись интуиционистские нечеткие множества (Intuitionistic Fuzzy Set, далее IFS) [14, 15]. Меры возможности, необходимости и достоверности используются, как новый подход к решению интуиционистских задач нечеткой оптимизации [16, 17]. Они также применяются в производстве, моделях запасов с дефицитом для получения оптимальных по Парето решений [18]. Многокритериальная оптимизация IFS применялась, например, в исследованиях [19–21].

Кроме того, применялись и методы динамического программирования для оптимизации проблем многоступенчатой цепочки поставок. Так была разработана модель нейродинамического программирования в работе [22] для решения двухэтапной задачи оптимизации запасов в условиях неопределенности спроса. Апробация модели на практи-

ке показала снижение затрат предприятия на 10%. Авторы исследования [23] сформулировали задачу маршрутизации запасов, управляемую поставщиком, в виде марковского процесса принятия решений и применили метод приближенного динамического программирования для ее решения. Авторы работы [24] разработали модель приближенного динамического программирования (Approximate Dynamic Programming, далее ADP) на основе лагранжевой релаксации для управления запасами сети с одним продуктом и несколькими сайтами. Авторы работы [25] используют методы ADP и применяют стохастическую аппроксимацию для расчета оптимальных уровней базовых запасов с учетом проблем поставщика новостей на горизонте нескольких периодов с невыполненными заказами и упущенных продаж. Авторы исследования [26] применяют методы ADP для решения проблемы управления запасами на нескольких предприятиях и с заданным количеством продуктов с учетом изменчивости некоторых процессов.

Обучение с подкреплением также применялось к проблеме управления запасами (Inventory Management Problem, далее IMP) [27]. Так коллектив авторов работы [28] используют Q-learning для четырехступенчатой IMP с 12-недельным циклом и нестационарным спросом. В работе [29] авторы обучили архитектуру нейронной сети Deep Q-Network, чтобы достигать почти оптимальных результатов в игре Beer Game – классический пример многоуровневой IMP. В работе [30] используются методы Q-обучения и модель SARSA для оптимального пополнения складских запасов со скоропортящимися товарами.

1.3. Выводы и формулировка проблемы исследования

Моделирование стало важным инструментом анализа и улучшения цепочек поставок в различных областях производства. Сложность цепочки поставок, наряду с растущим требованием минимизировать воздействие на окружающую среду, внедрять устойчивые методы и учитывать социальные и операционные соображения, привело к разработке широкого спектра моделей. В цепочке поставок древесины моделирование позволяет оптимизировать поток сырья от его происхождения до конечного пункта назначения за счет минимизации затрат, снижения воздействия на окружающую среду и повышения эффективности.

Как показал обзор литературы, существует большое количество работ, посвященных тематике SCM, однако многие модели и подходы неприменимы на практике при управлении лесопромышленным предприятием в вопросах формирования цепей поставок в совокупности с определением объемов производства.

Стоит отметить, что в существующих моделях сказывается отсутствие, во-первых, учета коэффициента полезного объема сырья, который дойдет до склада, который предстоит сперва отделить от гнили, а затем переработать в труху и далее путем пресса произвести ОСБ плиты, во-вторых, инструмента ежедневного принятия решения, основанного на предложении лотов с сырьем на бирже в текущий день. Например, работа [12] посвящена схожей проблеме, но не учитывает рассматриваемой особенности с полезным объемом сырья, который дойдет до склада, а, кроме того, при отсутствии качественного прогноза ситуации на товарно-сырьевой бирже (когда и в каком объеме появятся лоты в продаже на бирже) и вовсе не является применимой на практике. Работа [11] посвящена этой же проблеме, но с уклоном на ценообразование на конечные товары. Здесь также, как в работе [12], не наблюдается учет коэффициента полезного объема сырья, которое может дойти до склада. Кроме того, повторяется и вторая отрицательная сторона модели – нет возможности ежедневного принятия решения на основе текущего предложения на бирже. Однако стоит отметить, что проблема с учетом коэффициента полезного объема сырья не нова и рассматривалась в работе [13]. Эта статья посвящена оценке оптимального значения прибыли на всем горизонте планирования производственного цикла лесопромышленного производства, а именно: SCM и расчет объемов производства, где поток сырья осуществляется с товарно-сырьевой биржи. Однако, все также нет четкого описания, как использовать модель так, чтобы предприятие могло принимать решения, связанные одновременно с проблемами закупки сырья с биржи и с расчетом объемов производства так, чтобы значение прибыли в конце горизонта планирования было максимальным и одновременно предельно близким к оптимальному.

Таким образом, остается нерешенной проблема управления предприятием лесопромышленной от-

расли, у которого нет собственных источников сырья для производства, и которое каждый день принимает решение по формированию потока сырья с товарно-сырьевой биржи и одновременно по объему выпуска готовой продукции на всем горизонте планирования, максимизируя значение суммарной прибыли, в условиях неопределенности предложения лотов на бирже и с учетом коэффициента полезного объема сырья, технологии производства товаров и специфики логистики сырья до склада. Данная работа посвящена разработке модели, решающую текущую проблему.

2. Цель, задачи и гипотеза исследования

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

Рассмотрим источники поступления сырья на биржу. Биржа заключает договоры с арендаторами лесных участков из различных регионов об использовании торговой площадки. После совершения биржевой сделки между предприятием по переработке сырья (лесопромышленным комплексом) – заказчиком и арендатором лесных участков (лесозаготовителем) – продавцом, заявленный в договоре¹ объем сырья отправляется заказчику. Выкупить лот на бирже можно лишь целиком [11–13, 31–33].

Цель настоящего исследования заключается в разработке математической модели, которая позволяет формировать цепочки поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях неопределенности предложения и отличающуюся от уже известных моделей тем, что, во-первых, процесс принятия решения осуществляется ежедневно, и, во-вторых, позволяет учитывать вероятное время доставки сырья до склада и изменение рабочего объема сырья, которое зависит от внешних факторов (температура, насекомые и др.).

Задачи исследования:

1. Построение экономико-математической модели.
2. Составление алгоритма поиска решения для разработанной модели.
3. Анализ результатов тестирования модели.

¹ В договоре купли–продажи указываются способы и цена доставки древесины. Доставка может осуществляться силами предприятия, однако далее мы будем рассматривать доставку сырья силами поставщика.

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».

3. Математическая модель²

Любое производство, в том числе лесопромышленное, не способно функционировать без существования источника сырья. Для обеспечения поставок необходимого объема сырья требуется определить поставщиков древесины. Для этого воспользуемся услугами Санкт-Петербургской международной товарно-сырьевой биржи (СПбМТСБ)³. 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 товара. На бирже представлены многие регионы, откуда потенциально может поступать сырье [11–13, 33]. Входные данные для решения задачи будем специально 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 [11–13, 33].

Рассмотрим схему закупки сырья и расчет объемов производства. Известно, что максимизация прибыли на предприятии достигается тогда и только тогда, когда в единой модели происходит расчет 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 прини-

мает решение только сегодня с опорой на расчетную ситуацию на предприятии «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 с загруженностью на железных дорогах (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 запасов сырья на складе.

В этом случае можно построить регрессию, которая бы отражала среднее ожидаемое значение совокупно по всем типам сырья на складе \tilde{b}_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 $[m, \min(M, m + \tilde{T})]$, а значение ожидаемого суммарного объема сырья известно лишь на текущий день m \tilde{b}_m , то возникает вопрос о том, какой объем сырья на складе мы ожидаем в следующие дни $[m + 1, \min(M, m + \tilde{T})]$, где $m + 1 \neq M$.

Вернемся к найденным оптимальным траекториям суммарного объема сырья на складе на предыдущих E периодах. Отсюда можно рассчитать значение

$$\tau(m) = \begin{cases} \frac{\sum_{e=1}^E \sum_l b_{lm}(e)}{\sum_l b_{l(m-1)}(e)}, & m < M, \\ 0, & m = M \end{cases}$$

где $\sum_l b_{lm}(e)$ – это суммарный объем сырья по всем их типам l в день m для каждой отдельной выборки входных данных $e \in E$. Тогда будем осуществлять поиск такого решения текущей зада-

² С программной реализацией разработанной модели и статистикой продаж биржи можно ознакомиться по ссылке <https://drive.google.com/drive/folders/1THzU7BHjGgpUgZiXQbvJNaIA14biWO1t?usp=sharing>

³ <https://spimex.com/>

чи, которое бы принимало во внимание прогнозное значение \tilde{b}_m в текущий день m и некоторую коррекцию на весь период планирования $\min(M - m, \tilde{T})$ вперед

$$\prod_{t=1}^{\tilde{T}} \tau(m + \underline{t}), t = 0: \min(M - m, m + \tilde{T}).$$

Введем следующий 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_{nk} – максимальный объем производства товаров типа k в день m ;

\underline{b} – неприкосновенный уровень запаса сырья;

\bar{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 ;

$\varepsilon^{(3)}$ – шумовая (случайная величина) компонента рабочего объема сырья, который дошел до склада;

$left$ и $right$ – минимальное и максимальное значение случайной величины, распределенной по равномерному закону;

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

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

E – число различных наборов входных параметров $\{V_{ilrm}(e), c_{ilrm}(e), T_{\tilde{m}}(e)\}$.

Рассмотрим обозначение с тильдой над параметром и без. Будем считать, что значение с тильдой над переменной – это значение, которое оценивает предприятие, а без тильды – ее реальное значение. Так, например,

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

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

Переменные:

x_{km} – объем производства товаров типа k в день m ;

λ_{ilrm} – факт покупки 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 $F_m^{(1,2)}$ примет вид (1–18). Целевая функция (1) направлена на максимизацию значений прибыли в каждый день $m + t - 1$:

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

Соотношение (2) задает взаимоотношение между объемами сырья на складе, объемом потраченного на производстве сырья и объемами сырья, которые дошли до склада:

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

где

$t = 1: \tilde{T}$;

$\tilde{T} = \text{const}$;

$\tilde{T} \geq \max(\tilde{T}_{\tilde{m}})$;

$N^{(j)} \gg 1$;

$j = 1: 2$;

$b_{l(m-1)} = \text{const}$;

$\tilde{T} = \min(\tilde{T}, M - m + 1)$;

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

Ограничения (3–4) задают возможные пределы значений переменных, отвечающих за объем производства каждого типа товара в каждый день (3) и когда факт покупки сырья на бирже является переменной, а в каких случаях считается константой (4). Так переменная λ_{imrl} , отвечающая за факт принятия решения по покупке лота i в день \tilde{m} из региона r с типом сырья l является константой тогда и только тогда, когда $\tilde{m} \leq m$, где \tilde{m} – дата

появления рассматриваемого лота на бирже, а m – день принятия решения. В остальных случаях является переменной оптимизации:

$$x_{km} \in N, \tag{3}$$

$$\lambda_{imrl} = \begin{cases} \text{const}, \tilde{m} \leq m \\ \{0; 1\}, \begin{cases} \tilde{m} = m \\ \tilde{T}_{\tilde{m}} = t - 1. \end{cases} \end{cases} \tag{4}$$

Ограничение (5) направлено на то, чтобы поиск решения происходил с опором на необходимый суммарный объем сырья на складе. В конце горизонта планирования будем считать, что предприятие останавливает свое производство, поэтому ему не требуется сырье на складе:

$$\sum_l b_{l(m+t-1)} = \begin{cases} \min \left(\bar{b} \cdot \prod_{\underline{t}=1}^t \tau(m+\underline{t}) \cdot \tilde{b}_m(\{V_{imrl}\}_{i,r}, \{c_{imrl}\}_{i,r}, m) \right), \\ t \in (1, \tilde{T}) \\ 0, t = M - m + 1, \end{cases} \tag{5}$$

где

$$\sum_l b_{lm} = \tilde{b}_m(\{V_{imrl}\}_{i,r}, \{c_{imrl}\}_{i,r}, m);$$

$$\tau(m) = \begin{cases} \frac{\sum_{e=1}^E \sum_l b_{lm}(e)}{\sum_l b_{l(m-1)}(e)}, m < M \\ 0, m = M. \end{cases}$$

Неравенство (6) утверждает, что не может быть ситуации, чтобы объем сырья на складе опустился ниже нуля с учетом штрафных переменных $\varepsilon_{l(m+t-1)}^{(j)}$:

$$b_l(m+t-1) + \sum_{j=1}^2 (-1)^j \varepsilon_{l(m+t-1)}^{(j)} \geq 0. \tag{6}$$

Неравенство (7) отражает текущий уровень бюджета предприятия в каждый отдельный день $m + \underline{t} - 1$ на всем горизонте планирования $m: m + t - 1$:

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

где $\pi_0 = B_0$.

Неравенство (8) призвано не допустить ситуации, чтобы объем сырья на складе превышал показатель максимальной вместимости:

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

Формулы (9–10) – это система, разыгранные значения в соответствии с которой отражают максимальное время в пути лота:

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

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

Формулы (11–12) задают оценку коэффициента полезного объема сырья, которое дойдет до склада. В формуле (11) используется функция $\arctg(x)$ для отражения дошедшего до склада полезного объема сырья. Так как функция $y = \arctg(x)$ может принимать значения в интервале $[0; \pi/2]$, $x \in [0; \infty]$, то необходимо внести изменения в зависимость между значением коэффициента⁴ дошедшего до склада сырья и тем, сколько времени прошло с момента появления лота на бирже⁵ таким образом, чтобы выполнялось условие: $0 \leq \arctg(x) \leq 1$, $x \in [0; \infty]$, $\beta = \text{const}$, $\tilde{\beta} = \text{const}$:

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

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

Формулы (13–14) ограничивают значения некоторых переменных:

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

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

После решения происходит расчет следующих ключевых параметров (15–18):

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

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

⁴ Будем считать, что этот коэффициент находится в интервале от 0 до 1.

⁵ Введем допущение о том, что сырье, обозначенное в лоте, было произведено в тот же день, в который лот был выставлен на торги.

$$b_{im} = b_{im-1} - \sum_k A_{ik} x_{km} + \gamma_{im} \left(\sum_{i,r} V_{imrl} \lambda_{imrl} \right), \quad (17)$$

где $\tilde{m} = m - \tilde{T}_{im}$;

$$m = m + 1. \quad (18)$$

Пересчет основных показателей происходит после найденного решения для дня m (15–17). В равенстве (18) знак равно используется в качестве оператора присваивания значению слева от знака равно значению справа.

4. Калибровка модели

Для апробации модели было выбрано одно из ведущих лесопромышленных предприятий Приморского края. В наибольшей степени на бирже представлены предприятия из четырех регионов: 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.

Зная координаты предприятий, можно было бы вести с ними диалог напрямую, минуя биржу. Однако биржа скрывает реальные координаты, поэтому все сделки проводятся через биржу как со стороны покупателя, так и со стороны поставщика [11].

С официального сайта биржи и у предприятия за указанный период был собран массив следующих данных: цены предлагаемых заявок c_{im} , объемы заявок v_{ilm} , цены реализации конечных товаров p_{ki} , количество заявок по каждому типу сырья. Поскольку на сайте бирже работает программное обеспечение, которое не позволяет собирать данные автоматически, то можно сделать вывод, что данные не разрешается использовать в больших объемах, поэтому все вышеперечисленные значения будут зашумлены и незначительно изменены.

Основные исходные данные⁶, характеризующие предприятие, представлены в *таблицах 1 и 2*.

Таблица 1.

Основные исходные параметры предприятия

Параметры, ед. измерения	Значения
p_{km} , руб	$\forall m: (1; 1,5; 1,6; 1,7) \cdot 10^4$
$N^{(i)}$, у.е.	$15p_{km}$
\tilde{T} , дни	22
M , дни	100
\bar{b} , м ³	7000
FC , руб	100 000
B_0 , руб	3 000 000
L_r , км	(3740, 7560, 3250, 9000)
H_{nk} , ед.	$\forall m, k: H_{km} = 4$

Источники: предприятие, автор.

Таблица 2.

Затраты сырья на производство единицы продукции

	Номер товара (k)				
	1	2	3	4	
Номер типа сырья (l)	1	2	3	4	3
	2	1	3	3	5

Источники: предприятие.

Для вычислений воспользуемся высокоуровневым языком программирования Matlab и функцией из пакета расширения `intlinprog`⁷ для поиска решений задач линейной оптимизации.

При оценке функции⁸ $\tilde{b}_m(\{V_{imrl}\}_{i,r}, \{c_{imrl}\}_{i,r}, m)$ с входными параметрами $\{\{V_{imrl}\}_{i,r}, \{c_{imrl}\}_{i,r}, m\}$ использовались нейронные сети⁹ (НС) со следующими свойствами¹⁰: 10 скрытых слоев с функцией активации $\text{tg}(x)$, 1 выходной слой (ReLU), алгоритм обучения – Levenberg–Marquardt. Коэффициент детерминации (Евклидова метрика) $R^2 = 0,78$.

⁶ Автор не имеет прав на публикацию некоторых данных предприятия ввиду подписания им договора «О неразглашении коммерческой тайны». В связи с этим автор приносит свои извинения изучающим текущий труд.

⁷ <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html>

⁸ Данные для расчета взяты с Предприятия и с архива публикаций биржи.

⁹ <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/fitnet.html>

¹⁰ Применение НС обусловлено тем, что классические методы регрессионного анализа не дали положительных результатов.

5. Обсуждение

Рассмотрим, как изменялся объем сырья на складе (рисунки 1, 2). Видно, что поведение сырья на складе в среднем стабильно в отличие от результатов поиска оптимального решения [13], где максимальное значение суммарного запаса сырья достигается ближе к 70-му дню. Более того, редкие выбросы показывают, что состояние уровней сырья на складе являются стабильными, что позволяет предприятию оптимизировать управление складским помещением и выделить из него максимально точно необходимый объем склада, а осталь-

ную часть использовать под другие нужды без необходимости расширения или наоборот.

На рисунке 3 изображены объемы производства товаров. Видно, что в среднем объемы производства стремятся к максимальной отметке в четыре единицы. Редкие выбросы свидетельствуют о том, что производство работает стабильно. При поиске оптимального решения в работе [13] показано, что объемы производства всегда равны 4. Результаты работы текущего метода поиска решения достаточно близки к оптимальному, с точки зрения объемов производства.

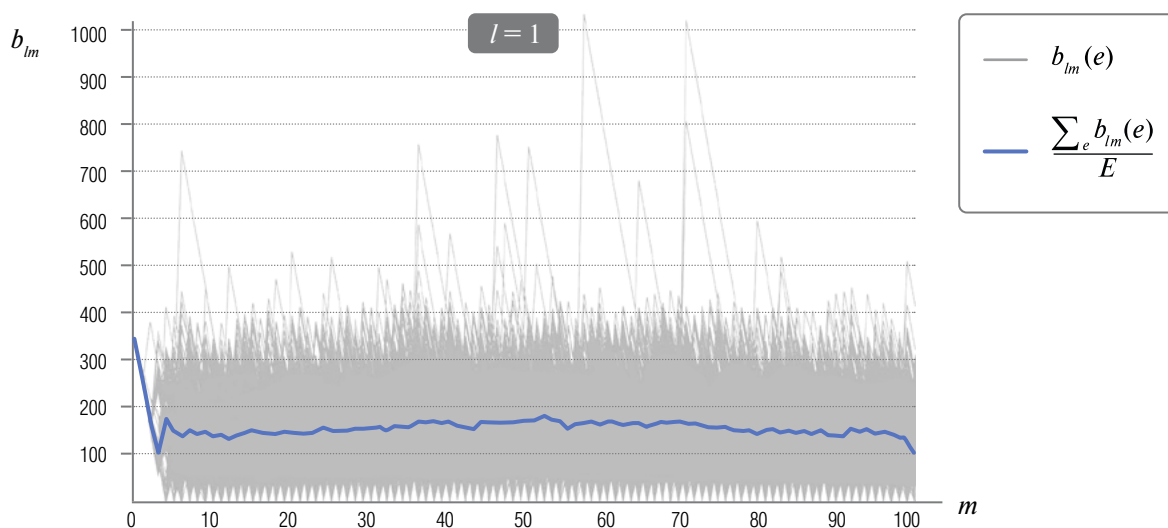


Рис. 1. Визуализация поведения траектории запасов сырья типа $l=1$ на складе на всем горизонте планирования.

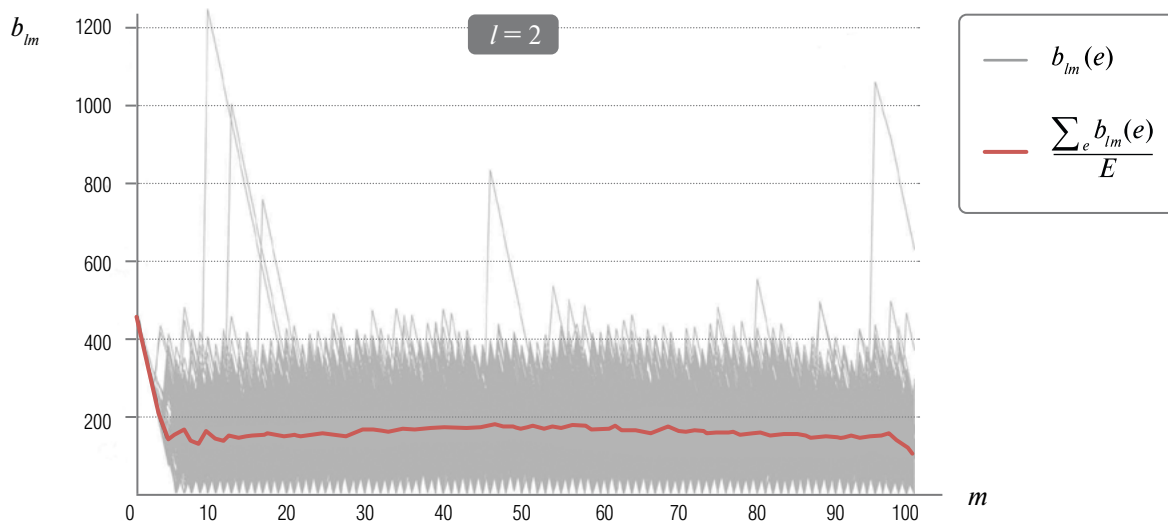


Рис. 2. Визуализация поведения траектории запасов сырья типа $l=2$ на складе на всем горизонте планирования.

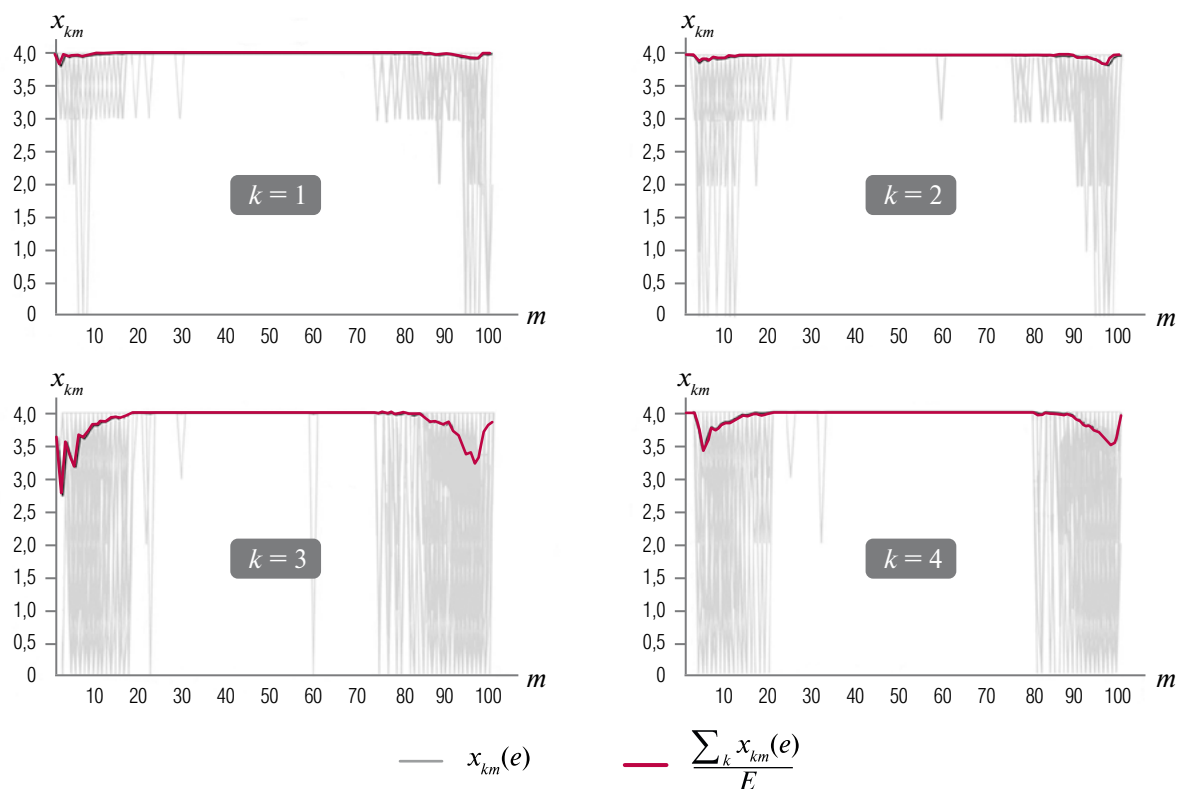


Рис. 3. Визуализация объемов производства товаров по каждому типу.

Наиболее важным показателем остается значение прибыли на всем горизонте планирования. Для оценки траектории прибыли рассмотрим рисунок 4. Обозначим через $opt_m(e)$ оптимальное значение прибыли в день m для выборки данных e .

Поведение средних значений объемов прибыли показывает, что доля отклонения от оптимального решения не значительна и составляет 0,1964 в конце горизонта планирования. Значение прибыли стабильно растёт.

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 поступит 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. Как показал анализ полученного решения на примере одного из предприятий Приморского края и данных биржи, полученная прибыль не сильно отличается от оптимального значения.
5. Данная модель может включать в себя и другие процессы лесопромышленного комплекса такие, как логистика, проблема раскрытия и другие.
6. Как следует из работы [12, 13, 34], необходимо учитывать изменение пропускной способности ЖД при формировании цепочек поставок. Данная работа учитывает эту особенность (ограничения (9–10)).
7. 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, зависящая от времени или от других факторов.

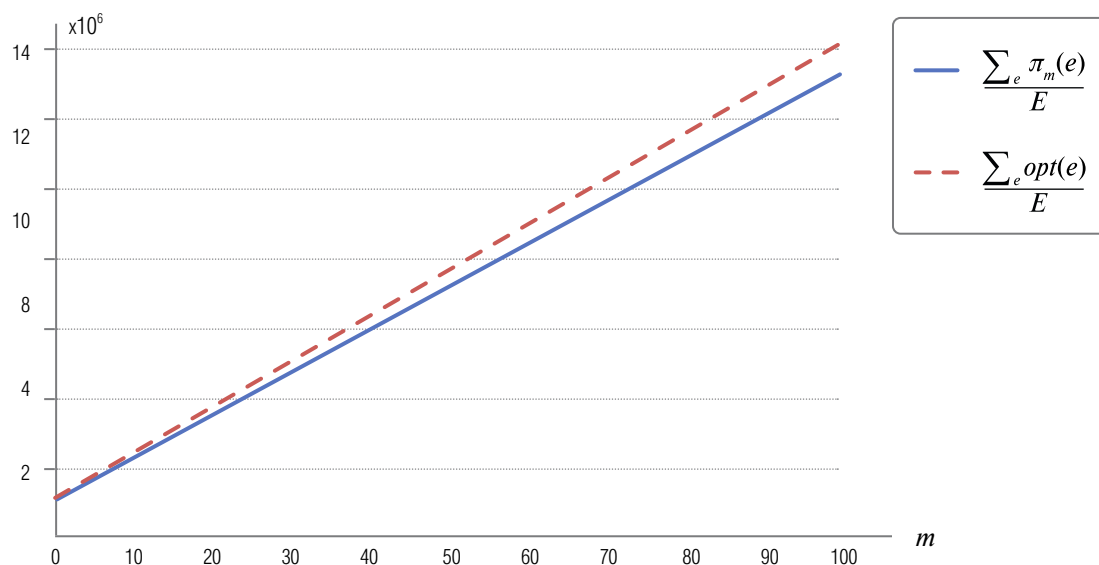


Рис. 4. Визуализация поведения траектории средних значений объемов прибыли на всем горизонте планирования.

2. В работе не рассматривается важный фактор процесса расчета стоимости товаров в каждый отдельный день или на период на всем горизонте планирования.
3. Важный фактор, 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 расчет расстояния, пройденного лотами следует рассчитывать не исходя из опыта работы предприятия (так существует высокая вероятность допустить ошибку в планировании), а математическими методами, например, нейронными сетями.
8. 2021 и 2022 годы 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 текущей работе не представлены какие-либо рассуждения по этому поводу.
9. Неясно, как будет работать модель в случае, если качество оценки суммарного объема запаса сырья на складе $(\tilde{b}_m(\{V_{imr}\}_{i,r}, \{c_{imr}\}_{i,r}, m))$ и $\tau(m)$ будет низкой, и будет ли в этой ситуации модель показывать такие же результаты.

Заключение

В работе рассмотрена модель, посвященная проблеме оптимального управления производством лесопромышленного предприятия в вопросах расчета объемов производства и формирования цепочек поставок сырья в условиях неопределенности. Модель позволяет максимизировать значение прибыли до налогообложения и представляет собой многопериодную задачу линейного программирования, отличающуюся возможностью принимать решения одновременно по обоим рассматриваемым вопросам: расчет объемов производства и формирование цепочек поставок. Результаты реализации модели включают структуру производства и последовательность закупки лотов с товарно-сырьевой биржи, а также дату последних поступления на склад. Многопериодность достигается разбиением

нием 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 формировании 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 суммарного объема сырья на складе в каждый отдельный день от значений текущих доступных лотов и номера дня. Также для планирования была рассчитана еще одна регрессия, которая позволяет оценить зависимость коэффициента изменения суммарного объема запаса сырья на складе от номера дня. Все регрессии рассчитывались на данных оптимальных траекторий запаса сырья, которые были получены путем использования одной из известных моделей поиска оптимального решения текущей задачи комплексно на всем горизонте планирования, которая принимала все необходимые разграниченные 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 потенциал в части добываемого сырья и более приемлемая ценовая политика 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 за редким исключением.

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. Kanchana S., Sneha P. A study on supply chain management in construction projects // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 5. P. 993–996.
2. Banihashemi S.A., Khalilzadeh M., Antucheviciene J., Edalatpanah S.A. Identifying and prioritizing the challenges and obstacles of the green supply chain management in the construction industry using the fuzzy BWM method // *Buildings*. 2023. Vol. 13. P. 38. <https://doi.org/10.3390/buildings13010038>
3. Cigolini R., Gosling J., Iyer A., Senicheva O. Supply chain management in construction and engineer-to-order industries // *Production Planning & Control*. 2022. Vol. 33. P. 803–810. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1837981>
4. Longhui L., Chuan Y., Lirong Q. Construction supply chain management: A systematic literature review and future development // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 382. Article ID: 135230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135230>
5. Cervený L., Sloup R., Cervená T., Riedl M., Palátová P. Industry 4.0 as an opportunity and challenge for the furniture industry – A case study // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Article ID: 13325. <https://doi.org/10.3390/su142013325>
6. Sachan S., Kumar V., Vardhan S., Mittal A., Verma P., Bag S. Key supply chain strategies for post-COVID-19 recovery: evidence from an Indian smart furniture industry // *International Journal of Emerging Markets*. 2022. Vol. 18. No. 6. P. 1378–1396. <https://doi.org/10.1108/IJOEM-12-2021-1926>
7. Ahmadreza A., Ajang T., Shademan P., Mohammad N. I., Lashgari A. Sustainable supply chain management and performance in Iran's wooden furniture industry // *Wood Material Science & Engineering*. 2022. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2116995>
8. Jaehn F., Juopperi R. A description of supply chain planning problems in the paper industry with literature review // *Asia–Pacific Journal of Operational Research*. 2019. Vol. 36. No. 01. 1950004. <https://doi.org/10.1142/S0217595919500040>
9. Mobtaker A., Montecinos J., Ouhimmou M., Rönnqvist M. Integrated forest harvest planning and road-building model with consideration of economies of scale // *Canadian Journal of Forest Research*. 2020. Vol. 50(10). P. 989–1001. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0380>
10. Monti C.A., Gomide L.R., Oliveira R.M., França L.C. Optimization of wood supply: The forestry routing optimization model // *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 2020. Vol. 92(3). <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020200263>

11. Рогулин Р.С. Математическая модель формирования ценовой политики и плана производственно-транспортной системы лесопромышленного предприятия // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 3. С. 60–77. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.3.60.77>
12. Рогулин Р.С. Модель оптимизации плана закупок сырья из регионов России лесоперерабатывающим комплексом // Бизнес-информатика. 2020. Т. 14. № 4. С. 19–35. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2020.4.19.35>
13. Рогулин Р.С. Модель поиска решения задачи о формировании цепочек поставок сырья в условиях неопределенности с товарно-сырьевой биржи на склад предприятий лесопромышленной отрасли с учетом производственно-логистических особенностей // Информационные технологии и вычислительные системы. 2023 (в печати).
14. De S.K., Sana S.S. A multi-periods production-inventory model with capacity constraints for multi-manufacturers – a global optimality in intuitionistic fuzzy environment // Applied Mathematical Computations. 2014. Vol. 242. P. 825–841.
15. De S.K., Goswami A., Sana S.S. An interpolating by pass to Pareto optimality in intuitionistic fuzzy technique for an EOQ model with time sensitive backlogging // Applied Mathematical Computations. 2014. Vol. 230. P. 664–674.
16. Chakraborty D., Jana D.K., Roy T.K. A new approach to solve intuitionistic fuzzy optimization problem using possibility, necessity, and credibility measures // International Journal of Engineering Mathematics. 2014. P. 1–12. <https://doi.org/10.1155/2014/593185>
17. Ahmadini A.A.H., Modibbo U.M., Shaikh A.A., Ali I. Multi-objective optimization modelling of sustainable green supply chain in inventory and production management // Alexandria Engineering Journal. 2021. Vol. 60. P. 5129–5146. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.075>
18. Chakraborty S., Pal M., Nayak P.K. Intuitionistic fuzzy optimization technique for Pareto optimal solution of manufacturing inventory models with shortages // European Journal of Operations Research. 2012. Vol. 228(2). P. 381–387.
19. Garg H., Rani M. An approach for reliability analysis of industrial systems using PSO and IFS technique // ISA Transactions. 2013. Vol. 52(6). P. 701–710.
20. Garg H., Rani M., Sharma S., Vishwakarma Y. Bi-objective optimization of the reliability-redundancy allocation problem for series-parallel system // Journal of Manufacturing Systems. 2014. Vol. 33(3). P. 335–347. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.02.008>
21. Garg H., Rani M., Sharma S., Vishwakarma Y. Intuitionistic fuzzy optimization technique for solving multi-objective reliability optimization problems in interval environment // Expert Systems with Applications. 2014. Vol. 41(7). P. 3157–3167. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.11.014>
22. Roy B.V., Bertsekas D.P., North L. A neuro-dynamic programming approach to admission control in ATM networks // Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Munich, Germany, 21–24 April 1997.
23. Kleywegt A.J., Non V.S., Savelsbergh M.W. Dynamic programming approximations for a stochastic inventory routing problem // Transportation Science. 2004. Vol. 38. P. 42–70.
24. Topaloglu H., Kunnumkal S. Approximate dynamic programming methods for an inventory allocation problem under uncertainty // Naval Research Logistics. 2006. Vol. 53. P. 822–841. <https://doi.org/10.1002/nav.20164>
25. Kunnumkal S., Topaloglu H. Using stochastic approximation methods to compute optimal base-stock levels in inventory control problems // Operations Research. 2008. Vol. 56. P. 646–664.
26. Cimen M., Kirkbride C. Approximate dynamic programming algorithms for multidimensional inventory optimization problems // Proceedings of the 7th IFAC Conference on Manufacturing, Modeling, Management, and Control, Saint Petersburg, Russia, 19–21 June 2013. Vol. 46. P. 2015–2020.
27. Perez H.D., Hubbs C.D., Li C., Grossmann I.E. Algorithmic approaches to inventory management optimization // Processes. 2021. Vol. 9. Article ID: 102. <https://doi.org/10.3390/pr9010102>
28. Mortazavi A., Khamseh A.A., Azimi P. Designing of an intelligent self-adaptive model for supply chain ordering management system // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2015. Vol. 37. P. 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2014.09.004>
29. Luo L., O’Hehir J., Regan C.M., Meng L., Connor J.D., Chow C.W.K. An integrated strategic and tactical optimization model for forest supply chain planning // Forest Policy and Economics. 2021. Vol. 131. Article ID: 102571. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102571>
30. Kara A., Dogan I. Reinforcement learning approaches for specifying ordering policies of perishable inventory systems // Expert Systems With Applications. 2018. Vol. 91. P. 150–158.
31. 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. <https://doi.org/10.3390/su14095066>
32. Wang S., Fang Z., Wu D. Internet of things-enabled tourism economic data analysis and supply chain modeling // Technological and Economic Development of Economy. 2022. P. 1–18. <https://doi.org/10.3846/tede.2022.17120>
33. Li J., Zhang R., Jin Y., Zhang H. Optimal path of internet of things service in supply chain management based on machine learning algorithms // Computational Intelligence and Neuroscience. 2022. Article ID 4844993. <https://doi.org/10.1155/2022/4844993>
34. Vinogradova M., Rogulin R., Ermakova M., Okhrimenko I. Assessing the sources of uncertainty in supply chain management // Strategic Change. 2021. Vol. 30(5). P. 453–460. <https://doi.org/10.1002/jsc.2465>

Об авторе

Роголин Родион Сергеевич

кандидат экономического наук;

доцент, кафедра математики и моделирования, Владивостокский государственный университет, Россия, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, д. 41;

старший преподаватель, департамент программной инженерии и искусственного интеллекта, Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690922, Приморский край, остров Русский, п. Аякс, д. 10;

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3235-6429

Mathematical model of the formation of supply chains of raw materials from a commodity exchange under conditions of uncertainty

Rodion S. Rogulin

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

Vladivostok State University

Address: 41, Gogolya Sreet, Vladivostok 690014, Russia

Far Eastern Federal University

Address: 10, Ajax Village, Russky Island, Primorskiy Territory 690922, Russia

Abstract

The formation of raw material supply chains is very closely related to production problems at a timber processing plant. Since the beginning of the second industrial revolution, one urgent question has been the formation of supply chains for raw materials and the optimal calculation of production volumes for each individual day. This article examines a forestry enterprise that does not have its own sources of wood, which daily solves the problem of ensuring the supply of raw materials and optimal production load. A commodity exchange is considered as a source of raw materials where lots randomly appear every day in different raw material regions. In the scientific literature, there are many approaches to calculating the optimal profit value over the entire planning horizon, but they do not consider many features that are important for a timber processing enterprise. This paper presents a mathematical model which is a

mechanism for making daily decisions over the entire planning horizon and differs in that it allows one to take into account the share of useful volume and the delivery time of raw materials under conditions of uncertainty. The result of the model is the optimal profit trajectory, considering the volume of raw materials, the delivery time of lots, the volume of profit and the production volume of goods. The model was tested on data from the Russian Commodity and Raw Materials Exchange and one of the Primorsky Territory enterprises. Analysis of the results showed that there are difficulties in planning supply chains and production volumes. An assessment of the optimality of raw material regions was carried out. The advantages and disadvantages of the mathematical model are formulated.

Keywords: production optimization, transport problem, forest industry, commodity exchange, supply chains, product release

Citation: Rogulin R.S. (2023) Mathematical model of the formation of supply chains of raw materials from a commodity exchange under conditions of uncertainty. *Business Informatics*, vol. 17, no. 4, pp. 41–56. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.41.56

References

1. Kanchana S., Sneha P. (2018) A study on supply chain management in construction projects. *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, pp. 993–996.
2. Banihashemi S.A., Khalilzadeh M., Antucheviciene J., Edalatpanah S.A. (2023) Identifying and prioritizing the challenges and obstacles of the green supply chain management in the construction industry using the fuzzy BWM method. *Buildings*, vol. 13, pp. 38. <https://doi.org/10.3390/buildings13010038>
3. Cigolini R., Gosling J., Iyer A., Senicheva O. (2022) Supply chain management in construction and engineer-to-order industries. *Production Planning & Control*, vol. 33, pp. 803–810. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1837981>
4. Longhui L., Chuan Y., Lirong Q. (2023) Construction supply chain management: A systematic literature review and future development. *Journal of Cleaner Production*, vol. 382, article ID: 135230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135230>
5. Cervený L., Sloup R., Cervená T., Riedl M., Palátová P. (2022) Industry 4.0 as an opportunity and challenge for the furniture industry – A case study. *Sustainability*, vol. 14, article ID: 13325. <https://doi.org/10.3390/su142013325>
6. Sachan S., Kumar V., Vardhan S., Mittal A., Verma P., Bag S. (2022) Key supply chain strategies for post-COVID-19 recovery: evidence from an Indian smart furniture industry. *International Journal of Emerging Markets*, vol. 18, no. 6, pp. 1378–1396. <https://doi.org/10.1108/IJOEM-12-2021-1926>
7. Ahmadreza A., Ajang T., Shademan P., Mohammad N. I., Lashgari A. (2022) Sustainable supply chain management and performance in Iran's wooden furniture industry. *Wood Material Science & Engineering*. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2116995>
8. Jaehn F., Juopperi R. (2019) A description of supply chain planning problems in the paper industry with literature review. *Asia–Pacific Journal of Operational Research*, vol. 36, no. 01, 1950004. <https://doi.org/10.1142/S0217595919500040>
9. Mobtaker A., Montecinos J., Ouhimmou M., Rönnqvist M. (2020) Integrated forest harvest planning and road-building model with consideration of economies of scale. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 50(10), pp. 989–1001. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0380>
10. Monti C. A., Gomide L. R., Oliveira R. M., França L. C. (2020) Optimization of wood supply: the forestry routing optimization model. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, vol. 92(3). <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020200263>
11. Rogulin R.S. (2021) Mathematical model for the formation of pricing policy and plan for the production and transport system of a timber industry enterprise. *Business Informatics*, vol. 15, no. 3, pp. 60–77. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.3.60.77>
12. Rogulin R.S. (2020) A model for optimizing the plan for the procurement of raw materials from the regions of Russia by a timber processing complex. *Business Informatics*, vol. 14, no. 4, pp. 19–35. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2020.4.19.35>
13. Rogulin R.S. Mathematical model for finding the optimal solution to the problem of forming supply chains of raw materials in conditions of uncertainty from the commodity exchange to the warehouse of timber industry enterprises, taking into account production and logistics features. *Journal of Information Technologies and Computing Systems*, 2023 (in press) (in Russian).
14. De S.K., Sana S.S. (2014) A multi-periods production-inventory model with capacity constraints for multi-manufacturers – a global optimality in intuitionistic fuzzy environment. *Applied Mathematical Computations*, vol. 242, pp. 825–841.
15. De S.K., Goswami A., Sana S.S. (2014) An interpolating by pass to Pareto optimality in intuitionistic fuzzy technique for a EOQ model with time sensitive backlogging. *Applied Mathematical Computations*, vol. 230, pp. 664–674.

16. Chakraborty D., Jana D.K., Roy T.K. (2014) A new approach to solve intuitionistic fuzzy optimization problem using possibility, necessity, and credibility measures. *International Journal of Engineering Mathematics*, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1155/2014/593185>
17. Ahmadini A.A.H., Modibbo U.M., Shaikh A.A., Ali I. (2021) Multi-objective optimization modelling of sustainable green supply chain in inventory and production management. *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, pp. 5129–5146. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.075>.
18. Chakraborty S., Pal M., Nayak P.K. (2012) Intuitionistic fuzzy optimization technique for Pareto optimal solution of manufacturing inventory models with shortages. *European Journal of Operations Research*, vol. 228(2), pp. 381–387.
19. Garg H., Rani M. (2013) An approach for reliability analysis of industrial systems using PSO and IFS technique. *ISA Transactions*, vol. 52(6), pp. 701–710.
20. Garg H., Rani M., Sharma S., Vishwakarma Y. (2014) Bi-objective optimization of the reliability-redundancy allocation problem for series-parallel system. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 33(3), pp. 335–347. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.02.008>
21. Garg H., Rani M., Sharma S., Vishwakarma Y. (2014) Intuitionistic fuzzy optimization technique for solving multi-objective reliability optimization problems in interval environment. *Expert Systems with Applications*, vol. 41(7), pp. 3157–3167. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.11.014>
22. Roy B.V., Bertsekas D.P., North L. A neuro-dynamic programming approach to admission control in ATM networks. Proceedings of the *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Munich, Germany, 21–24 April 1997*.
23. Kleywegt A.J., Non V.S., Savelsbergh M.W. (2004) Dynamic programming approximations for a stochastic inventory routing problem. *Transportation Science*, vol. 38, pp. 42–70.
24. Topaloglu H., Kunnumkal S. (2006) Approximate dynamic programming methods for an inventory allocation problem under uncertainty. *Naval Research Logistics*, vol. 53, pp. 822–841. <https://doi.org/10.1002/nav.20164>
25. Kunnumkal S., Topaloglu H. (2008) Using stochastic approximation methods to compute optimal base-stock levels in inventory control problems. *Operations Research*, vol. 56, pp. 646–664.
26. Cimen M., Kirkbride C. Approximate dynamic programming algorithms for multidimensional inventory optimization problems. Proceedings of the *7th IFAC Conference on Manufacturing, Modeling, Management, and Control, Saint Petersburg, Russia, 19–21 June 2013*, vol. 46, pp. 2015–2020.
27. Perez H.D., Hubbs C.D., Li C., Grossmann I.E. (2021) Algorithmic Approaches to Inventory Management Optimization. *Processes*, vol. 9, article ID: 102. <https://doi.org/10.3390/pr9010102>
28. Mortazavi A., Khamseh A.A., Azimi P. (2015) Designing of an intelligent self-adaptive model for supply chain ordering management system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 37, pp. 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2014.09.004>
29. Luo L., O’Hehir J., Regan C.M., Meng L., Connor J.D., Chow C.W.K. (2021) An integrated strategic and tactical optimization model for forest supply chain planning. *Forest Policy and Economics*, vol. 131, article ID: 102571. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102571>
30. Kara A., Dogan I. (2018) Reinforcement learning approaches for specifying ordering policies of perishable inventory systems. *Expert Systems with Applications*, vol. 91, pp. 150–158.
31. Prajapati D., Chan F.T.S., Chelladurai H., Lakshay L., Pratap S. (2022) An Internet of Things embedded sustainable supply chain management of B2B E-Commerce. *Sustainability*, vol. 14, article ID: 5066. <https://doi.org/10.3390/su14095066>
32. Wang S., Fang Z., Wu D. (2022) Internet of things-enabled tourism economic data analysis and supply chain modeling. *Technological and Economic Development of Economy*, pp. 1–18. <https://doi.org/10.3846/tede.2022.17120>
33. Li J., Zhang R., Jin Y., Zhang H. (2022) Optimal path of internet of things service in supply chain management based on machine learning algorithms. *Computational Intelligence and Neuroscience*, article ID 4844993. <https://doi.org/10.1155/2022/4844993>
34. Vinogradova M., Rogulin R., Ermakova M., Okhrimenko I. (2021) Assessing the sources of uncertainty in supply chain management. *Strategic Change*, vol. 30(5), pp. 453–460. <https://doi.org/10.1002/jsc.2465>

About the author

Rodion S. Rogulin

Cand. Sci. (Econ.);

Associated Professor, Department of Mathematics and Modeling, Vladivostok State University, 41, Gogolya Street, Vladivostok 690014, Russia;

Senior Lecturer, Software and Artificial Intelligence Department, Far Eastern Federal University, 10, Ajax Village, Russky Island, Primorskiy Territory 690922, Russia;

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3235-6429