



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 338.001.36

Jel Classification: C44, C61, D24.

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-7>

Оптимизация лесопромышленных цепочек поставок: математическая модель и анализ региональных источников на примере Приморского края



Родион Сергеевич Рогулин

*Владивостокский государственный университет экономики и сервиса,
Владивосток, Россия.*

✉ rafassiaofusa@mail.ru

Родион РОГУЛИН

АННОТАЦИЯ

Оптимизация поставок сырья тесно связана с проблемами, возникающими на лесоперерабатывающих предприятиях. Оценка оптимальности решений часто становится актуальным вопросом.

В данной статье рассматривается сценарий работы лесопромышленного предприятия без собственных источников сырья, таких как лесозаготовители, которое стремится найти оптимальное решение на конечном этапе планирования, основываясь на данных о предъюдущих сделках. В качестве источника сырья рассматривается товарно-сырьевая биржа, где лоты ежедневно появляются в различных регионах добывающих предприятий в случайном порядке.

Научная литература предлагает множество методов расчёта оптимальной прибыли на протяжении всего планового периода, но эти подходы не учитывают многие важные особенности лесоперерабатывающих предприятий.

В данной работе представлена математическая модель, которая позволяет оценить оптимальный путь для

значений прибыли на протяжении всего периода планирования. Отличительной чертой модели является учёт доли полезного объёма сырья, который можно использовать в производстве ОСБ-плит после зачисления на склад, а также учёт времени доставки лотов в условиях неопределённости.

После проведения тестирования на данных товарно-сырьевой биржи России и одного из предприятий Приморского края, модель была применена для расчёта оптимальной траектории прибыли для различных данных, включая объёмы сырья, время доставки лотов и другие важные показатели производства, такие как объём прибыли и объём производства товаров. Анализ результатов выявил сложности в планировании цепочек поставок и объёмов производства. Также проанализированы регионы в качестве источников сырья, определено, из каких регионов и в какой момент стоит закупать сырьё. В статье подробно рассмотрены недостатки и преимущества математической модели.

Ключевые слова: цепочки поставок, оптимизация решений, сырьевая биржа, математическая модель, оптимальная траектория прибыли, доли полезного объёма сырья, время лота в пути.

Для цитирования: Рогулин Р. С. Оптимизация лесопромышленных цепочек поставок: математическая модель и анализ региональных источников на примере Приморского края // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 5 (108). С. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-7>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Компании давно занимаются разработкой и экспериментами с инновационными гибкими организационными и управленческими решениями. Сложность принятия решений на предприятиях сегодня растёт, влияя на устойчивость цепочек поставок. Современные требования включают в себя высокое качество, конкурентоспособные цены и быстрые сроки разработки программного обеспечения, моделей и подходов [1–10].

Компании, стремящиеся адаптироваться к текущей ситуации, должны следовать трендам и внедрять стратегические системы с использованием различных методов управления и инструментов оптимизации. Анализ больших объёмов данных становится ключевым для достижения удовлетворённости клиентов. Внедрение результатов работ в рамках Индустрии 4.0 может значительно улучшить решения на предприятиях, соответствуя современным вызовам качества [11–19].

Современные исследования подчёркивают важность удовлетворённости клиентов при управлении цепочками поставок. Это включает управление запасами, изменения в объёмах поставок во времени и внешних факторах. Развитие технологий привело к изменениям в логистике и финансовой интеграции бизнес-процессов, снижая затраты и предоставляя персонализированные услуги с более короткими сроками доставки [20–28].

Цепочки поставок теперь представляют собой сеть взаимодействующих организаций, предоставляющих индивидуальные продукты и услуги. Эффективность системы зависит от интерактивных возможностей узлов сети и использования интерактивных технологий. Стабильные отношения, координация, эффективный поток информации и управление запасами по принципу «точно в срок» являются ключевыми характеристиками успешной цепочки поставок.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В академических исследованиях [2; 4; 6] освещается вопрос о влиянии различных факторов, таких как глобализация, на управление цепями поставок. Одним из направлений исследований является применение программного обеспечения и математического программирования для имитации и моделирования реальных сценариев с целью поддержки принятия стратегически

важных решений руководителями. Например, в работе [1] представлена модель геометрического программирования, решающая задачу ценовой дифференциации и планирования производства с максимизацией прибыли на различных площадках цепочки поставок, что было исследовано на примере поставок одежды.

Статья [5] затрагивает моделирование цепей поставок с использованием уравнений в частных производных и обыкновенных дифференциальных уравнений. Здесь рассматриваются как численные, так и точные методы оптимизации для минимизации стоимости. В работе [7] решается проблема аутсорсинга в управлении цепями поставок, предложена математическая модель и проведён численный эксперимент с использованием реальных данных для определения оптимального баланса между производством и аутсорсингом с минимальной общей стоимостью цепочки поставок.

Другие исследования [8; 23–25; 27] фокусируются на моделировании и оптимизации цепей поставок в различных условиях неопределённости и изменчивости внешней среды. В этих работах предложены различные математические модели, включая стохастическое программирование, метод ветвей и границ, генетические алгоритмы, с целью повышения устойчивости и эффективности цепей поставок. Исследования [24; 25; 27] также обращают внимание на формирование цепей поставок и рассчитывают объёмы производства, принимая во внимание адекватный прогноз данных.

Эти разнообразные исследования в совокупности представляют глубокий взгляд на различные аспекты управления цепями поставок, включая ценовую дифференциацию, аутсорсинг, производственную оптимизацию, и обеспечивают полезные инсайты для разработки стратегий в условиях современной динамичной бизнес-среды.

В литературе сегодня активно обсуждаются аспекты управления цепями поставок (Supply Chain Management, SCM), где модели становятся всё более многопериодными и охватывают несколько целевых функций. Статья [9] представляет многоцелевую модель задачи производственного распределения в цепи поставок, включающей поставщиков, производителей, дистрибьюторов и клиентов. Она использует модель смешанного целочис-



ленного линейного программирования (MILP) для проектирования многопериодной цепочки поставок. В то же время модель GFLP предназначена для оптимизации задачи производства-распределения в сети цепочки поставок.

В работе [10] представлена операционная политика для трёхступенчатой цепочки поставок, учитывающая ухудшающийся характер сырья и конечной продукции. Авторы разработали модель, которая применена к реальному случаю и продемонстрировала способность увеличить общую прибыль цепочки поставок на 15 %.

Проблема перепроектирования цепи поставок товаров массового потребления с учетом финансовых критериев и сценариев спроса рассматривается в статье [12], где использована многоцелевая модель смешанного целочисленного линейного программирования. Эта модель учитывает максимизацию чистой приведённой стоимости цепочки поставок и минимизацию финансового риска.

В [17] разработана многоцелевая модель для определения оптимального уровня запасов и их распределения между поставщиками с фокусом на минимизации затрат и максимизации качества. В работе [18] представлена многопериодная модель смешанного целочисленного нелинейного программирования для оптимизации принятия решений в области сбыта готовой продукции. Результаты апробации модели на реальных данных показали её способность снижать эксплуатационные расходы.

Новая бизнес-модель для многоступенчатой схемы управления запасами в цепи поставок представлена в исследовании [22]. Эта модель прошла тестирование на 288 экспериментах, оценивающих влияние перевалки на производительность цепочки поставок. В [29] решается проблема минимизации стоимости цепей поставок сырья с товарно-сырьевой биржи, используя две целевые функции для учета издержек и минимального отклонения от рассчитанного плана приобретения сырья.

Исследования в области управления цепями поставок охватывают разнообразные проблемы, на что указывают работы других авторов. Например, в работе [3] представлен анализ данных для прогнозирования сбоев в цепи поставок первого уровня. Результаты исследования указывают на эффективность математических функций, включая гибкость,

в предсказании просроченных заказов с точностью до 80 %. В [11] проведен анализ количественных моделей устойчивого управления цепями поставок, подчеркивая, что часто создаваемые модели SCM не учитывают важный фактор – анализ жизненного цикла в дизайне сетей цепочки поставок. Интересен подход, представленный в [13], где использованы цветные сети Петри для моделирования управления цепочками поставок с многоагентной структурой, позволяющей указать желаемый уровень детализации системы. Проблема координации в устойчивой цепочке поставок, учитывая экологическую и социальную осведомленность потребителей, рассмотрена в [14]. Теоретико-игровой подход применен для оптимизации цепочки, учитывая чувствительность потребителей к экологическому качеству продукта и социальной ответственности цепочки поставок. В [16] представлен обзор применения нечётких методов в моделировании цепей поставок, исследуются требования к математической модели интегрированной цепи поставок. Модель системной динамики для визуализации цепи поставок при внедрении аддитивного производства представлена в [19]. Разработанная модель подверглась проверке, и результаты анализа чувствительности подтверждают ее достоверность. В работе [20] исследуется дизайн сети цепи поставок, учитывая разработку новых продуктов и включение управления взаимоотношениями с клиентами и неопределённость спроса. Работа оценена на данных реального предприятия. В [21] предложена система оптимизации на основе данных о рисках для управления цепями поставок, интегрирующая генетический алгоритм с многослойной нейронной сетью. Результаты показывают снижение уровня запасов и увеличение прибыли.

Рассматриваемая тема в контексте управления цепями поставок (SCM) является актуальной и получила значительное внимание в литературе. Однако следует выделить несколько важных аспектов, которые остаются до настоящего времени недостаточно освещёнными:

1. Отсутствие анализа управления цепочками поставок сырья в условиях неопределённости и рисков, особенно с точки зрения товарно-сырьевых бирж. В современных условиях сырьевые сделки часто проводятся

в формате B2B между делаянами и предприятиями-переработчиками. Введение инструментов товарно-сырьевых бирж может повысить прозрачность сделок, сократить сроки налаживания связей и расширить клиентскую базу, что, в свою очередь, положительно скажется на конкурентоспособности цен и общей эффективности снабжения.

2. Недостаточное внимание уделено оценке максимально возможной прибыли на всем горизонте планирования в условиях неопределённости и с особенностями лесопромышленной отрасли. Эта проблема критична для оценки эффективности IT-решений и качества управления организацией в контексте SCM.

3. Отсутствие подробного рассмотрения особенностей изменения объёма древесины в лесопромышленной отрасли в процессе транспортировки. Этот аспект требует учета при формировании производственного плана и управлении цепями поставок сырья до достижения склада предприятия.

Таким образом, необходимо углубленное исследование данных аспектов для более полного понимания и развития стратегий в области управления цепями поставок.

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ГИПОТЕЗА ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим функционирование организаций в лесопромышленной сфере. В данном контексте важны два ключевых процесса: транспортировка и приобретение сырья на товарно-сырьевых биржах, а также изготовление различных продуктов на основе имеющихся запасов сырья. Чтобы более чётко представить себе процесс, стоит выделить, что сырьё на бирже предоставляется арендаторами и делаянами из различных регионов. Эти субъекты заключают договора с биржей, что предоставляет им право торговать на площадке. При заключении сделки между предприятием-заказчиком и делаяной-поставщиком заказчику направляется заявленный объём сырья [23, 25].

Как правило, компании получают заказы заблаговременно, что даёт возможность для долгосрочного планирования. Однако, стоит отметить, что спрос на продукцию в лесопромышленной отрасли подвержен сезонным колебаниям, что создаёт сложности в планировании деятельности компании [23, 25].

Основная цель исследования заключается в разработке математической модели, способной оптимизировать объём выпуска товаров

для лесопромышленного предприятия. Эта модель учитывает формирование и поступление цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи, а также учитывает условия неопределённости предложения и логистики для максимизации прибыли на всем горизонте планирования.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

1. Провести анализ существующих научных работ по проблеме.

2. Разработать экономико-математическую модель для формирования цепочек поставок сырья и определения оптимального объёма производства товаров в условиях учёта заявок и времени доставки лотов на склад предприятия.

3. Провести анализ результатов тестирования модели.

Гипотеза исследования состоит в том, что существует модель, способная эффективно оценить оптимальную траекторию прибыли на всем горизонте планирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Математическая модель

Производственные предприятия, включая лесопромышленные, не могут обойтись без устойчивой сырьевой базы. Для анализа использования сырьевой базы мы обратимся к информации, предоставляемой Санкт-Петербургской Международной Товарно-сырьевой Биржей (в дальнейшем – биржа), доступной в открытом доступе. Биржа регулярно предоставляет данные о совершённых сделках, их объёмах и ценах, а также об услугах по доставке сырья, включённых в общую стоимость товара. Многие регионы, предоставляющие потенциальное сырьё, представлены на бирже [23; 25]. Приобрести лот возможно только полностью, согласно правилам функционирования товарно-сырьевой биржи [23; 25].

Процесс производства охватывает несколько этапов: сначала сырьё поступает на склад, затем происходит его измельчение в труху, после чего оно прессуется в плиты ориентированной стружки (ОСБ). ОСБ-плиты производятся отдельно для каждого вида сырья.

Транспортировка осуществляется по железнодорожным путям с использованием Транссибирской магистрали за счет отпрати-



теля, который включает все расходы по транспортировке лота в его цену.

Введём обозначения для параметров и переменных данной системы.

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} – объём сырья в лоте i с типом сырья l из региона r , появившаяся на бирже в день m ;

H_{km} – максимальный объём 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;

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

L_r – расстояние от склада до региона r ;

S_m – расстояние, пройденное заявкой в день m ;

β – константа;

$\varepsilon^{(1)}$ – шум;

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

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

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

Переменные:

x_{km} – объём 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 .

Обозначим решаемую задачу для каждого набора параметров e (список параметров указан выше) как $F^{(1,1)}(e)$:

$$\sum_{k,m} p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r,m} c_{ilrm} \lambda_{ilrm} \rightarrow \max; \quad (1)$$

$$b_{lm} = b_{l,m-1} - \sum_k A_{lk} x_{km} + \gamma_{\tilde{m}m} \sum_{l,r} V_{ilrm} \lambda_{ilrm}; \quad (2)$$

где выполняется условие $\tilde{m} = m - T_{\tilde{m}}$.

$$x_{km} \in N; \quad (3)$$

$$\lambda_{ilrm} = \{0; 1\}; \quad (4)$$

$$0 \leq \sum_l b_{lm} \leq \bar{b}; \quad (5)$$

$$0 < \underline{b} \leq b_{lm}; \quad (6)$$

$$B_0 + \sum_{m=1}^m \left(\sum_k p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r} c_{ilrm} \lambda_{ilrm} - FC \right) \geq 0, m = 1 : M, \quad (7)$$

где $\tilde{m} = m - T_{\tilde{m}}$.

$$T_{\tilde{m}} = m^* : \begin{cases} L_r - \sum_{m=\tilde{m}}^m S_m \rightarrow \min \\ L_r - \sum_{m=\tilde{m}}^m S_m \leq 0 \end{cases}; \quad (8)$$

$$S_m \sim LN(a_m, \delta_m) \quad (9)$$

$$\gamma_{\tilde{m}m} = \min(1, \max[\dots]);$$

$$\gamma_{\tilde{m}m} = \min \left(1, \max \left[0; 1 - \frac{2}{\pi} \arctg(\beta(m - \tilde{m})) + \varepsilon^{(1)} \right] \right); \quad (10)$$

$$\varepsilon^{(1)} \sim U(left, right); \quad (11)$$

$$0 \leq x_{km} \leq H_{km}. \quad (12)$$

Поясним, что в ограничениях (2) и (7) значения $V_{ir(m-T_{\tilde{m}})}$ записываются в систему

ограничений тогда и только тогда, когда выполняется условие $\tilde{m} = m - T_{\tilde{m}}$. Задача $F^{(1,1)}(e)$

решается для всех $e = 1 : E$.

Рассмотрим математические выражения (1–12) в более подробном контексте. Целевая функция (1) стремится к максимизации общей прибыли в последний день планирования. Уровень запаса сырья в день m определяется формулой (2), учитывая затраты на производство, остаток сырья от предыдущего дня, а также поступление сырья на склад в текущий день с учетом времени в пути \tilde{m} и доли полезного объёма сырья. Объём производства (3) ограничен целыми неотрицательными значениями. Решение о приобретении лота на складе ограничено сверху (5) и снизу (6) в соответствии с максимальной вместимостью и невозможностью отрицательных значений. Каждое предприятие оперирует в пределах своего бюджета, представленного ограничением (7). Время в пути для каждой заявки рассчитывается по (8–9). Предполагается, что случайная величина расстояния, которое преодолевает лот в день m , имеет логнормальное распределение, связанное с сезонностью железнодорожных маршрутов, детали которой можно изучить в [25; 27; 29]. Коэффициент полезного объёма сырья задаётся формулами (10–11). Предположим, что $\varepsilon^{(1)}$ имеет равномерное распределение, поскольку нет

Таблица 1

Основные входные параметры Предприятия

$\forall m > 0: p_{km}, k = 1: K, руб$	$(1.01, 1.4, 1.65, 1.8) \cdot 10^4$
$\bar{b}, м^3$	3100
$\underline{b}, м^3$	19
$B_0, руб$	$2.99 \cdot 10^6$
$left(m), у. е.$	$\frac{100}{m \cdot 10^5}$
$right(m), у. е.$	$\frac{100}{m \cdot 10^5}$
$\forall m, k > 0: H_{km}$	4
$L_r, r = 1: R, км$	(3750, 7540, 3260, 9010)

Источники: Предприятие, биржа, некоторые данные сгенерированы автором

Таблица 2

Затраты сырья на производство единицы товара

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

Источники: Предприятие. См. примечание к таблице 1.

оценок изменения рабочего объёма сырья во времени. Объём произведённой продукции (12) ограничен физическими причинами.

Как следует из описания модели $F^{(1,1)}(e)$, она является задачей нелинейного и стохастического программирования. Для решения поставленной задачи необходимо рассмотреть алгоритм решения. Алгоритм решения примет вид:

1. Определить значения (8–9) и γ_{nm} с учетом (11);

2. Решить задачу смешанно-целочисленного программирования (1–7, 12) для каждого набора данных e .

Калибровка

Исследование модели включало тестирование на двух наборах данных: во-первых, на данных о деятельности предприятия, расположенного в Приморском крае (в дальнейшем – Предприятие), а во-вторых, на сгенерированных данных, созданных автором исследования.

Подробнее рассмотрим процесс генерации данных, связанных с распределением лотов во времени. Для этого использовалась информация с товарно-сырьевой биржи за 120 дней, начиная с 01.03.2019 года. Каждые 30 дней производился расчёт математического ожидания и дисперсии количества заявок, объёмов сырья в каждой заявке и средней цены за $1 м^3$. Затем, используя нормальное распределение с вычисленными характеристиками,

были созданы E наборов данных. Остальные параметры логистики и производственных процессов (\bar{b} , \underline{b} , B_0 , FC , a_m , δ_m , β , L_r) были взяты из данных Предприятия, соответствуя их оценкам.

Для конкретности примем $K = 4$ типа товаров, горизонт планирования $M = 100$ дней, типов сырья $L = 2$, количество регионов $R = 4$, количество лотов каждый день в диапазоне $0 \leq I \leq 6$, и 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 охватывает период с 1 марта 2019 года по середину июня 2019 года.

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

Для проведения вычислений воспользуемся высокоуровневым языком программирования Matlab и встроенной функцией `intlinprog` для поиска решений задач смешанно-целочисленной линейной оптимизации.

ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим рис. 1. На этом графике представлены динамика объёмов производства на конец каждого дня m . Интересно, что, несмотря на более высокие цены на товары 3 и 4, результаты анализа свидетельствуют о стабильности объёмов производства для



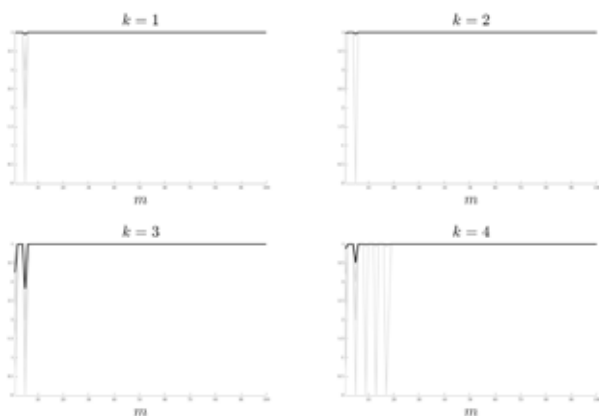


Рис. 1. Визуализация объемов производства.

Источник: автор с опорой на данные Предприятия и выходные данные математической модели.

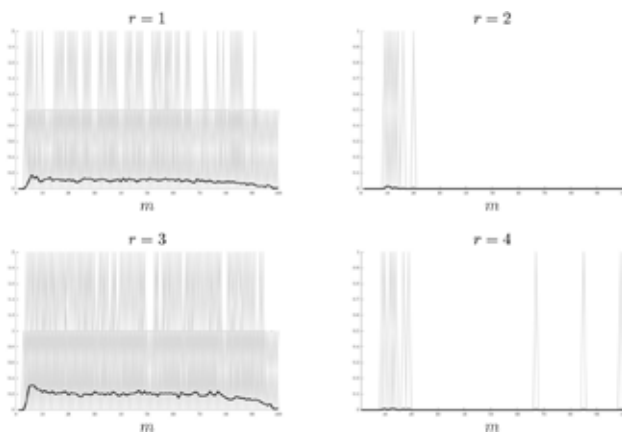


Рис. 2. Визуализация частоты приобретения лотов в каждом регионе ($l = 1$).

Источник: автор с опорой на данные Предприятия и выходные данные математической модели.

товаров 1-го и 2-го типа – их графики практически не подвержены колебаниям, что нельзя сказать о товарах 3 и 4.

Рассмотрим рис. 2 и 3. На них отражаются факты принятия решения касательно покупки лотов для сырья типа 1.

Наиболее частыми для приобретения сырья с биржи на всем горизонте планирования можно отнести следующие регионы: Бурятия и Иркутская область. Исходя из результатов исследований [23–25; 29] следует, что обычно территориальная близость играет важную роль в принятии решений об объемах приобретаемого сырья. Несмотря на территориальную близость к Иркутской области КНР и наличие прямой железнодорожной ветки¹ это не сказывается на ценах на сырье. Кроме того, факт приобретения сырья в более отдаленном регионе – Бурятия, сказывается на

рабочем объеме сырья, который приходит на склад, и времени в пути. В работах [25; 29] демонстрируется, что в основном стоит приобретать сырье в Иркутской области, что идет в разрез с результатами текущего исследования.

На рис. 4 изображены показатели прибыли π_m (e) в каждый отдельный день. Видно, что влияние постоянных издержек невелико на текущее значение прибыли. Отставание от среднего значения прибыли наблюдается лишь в небольшом количестве случаев.

Рассмотрим положительные и отрицательные стороны полученной модели.

1. Отрицательные стороны:

1.1. В реальном производстве в процессе планирования едва ли можно представить ситуацию, когда менеджеры ответственные за принятия решений могут знать реальное распределение во времени лотов со всеми их характеристиками, поэтому важно:

1.1.1. Собирать различные данные, связанные с поставленной задачей, за большой

¹ Карты международных транспортных коридоров (Евразия). Express+. [Электронный ресурс]: <http://www.expresstk.ru/wp-content/uploads/2017/08/Evroaziatskie-transportnye-koridory.pdf>. Доступ 27.04.2023.

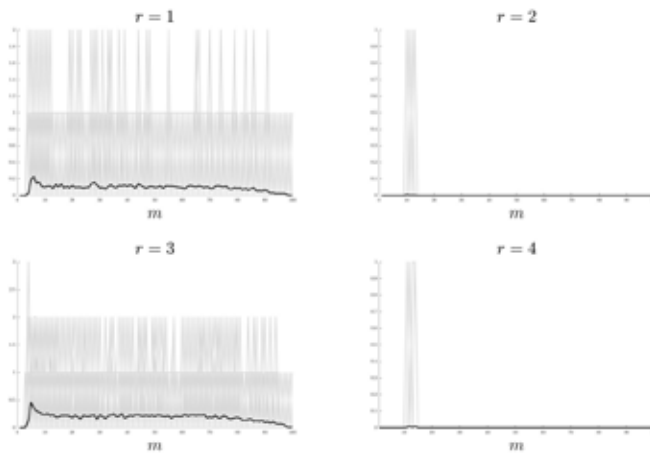


Рис. 3. Визуализация частоты приобретения лотов в каждом регионе ($l = 2$).
 Источник: автор с опорой на данные Предприятия и выходные данные математической модели.

промежуток времени, однако на сайте биржи доступны лишь данные с начала 2010-х годов, что крайне усложняет процесс формирования достаточного объёма выборки данных для анализа. Стоит отметить, что с течением времени эта проблема становится менее актуальной, так как растёт объём отчётов по совершенным сделкам;

1.1.2. Строить сложные математические модели для максимально точного прогноза распределения заявок во времени. Однако в теории аукционов давно известно, что прогнозировать ситуацию на биржах достаточно непростая задача, так как на биржах по мере допуска на них частных инвесторов (в контексте текущей задачи – малых предприятий) растёт влияние настроений, а последние очень плохо поддаются прогнозированию. Исходя из этого аргумента резко растёт актуальность развития методов прогнозирования ситуаций на биржах не только ценных бумаг, но и на сырьевых.

1.2. Быстро растущее количество ограничений из-за линейности модели [24].

1.3. Для каждого дня необходимо знать параметры a_m , δ_m , которые могут меняться с течением лет.

1.4. Нет чёткого объяснения о допустимости использования логнормального распределения величины пройденного расстояния лотом.

1.5. Параметр β должен также изменяться во времени, потому что летом изменения показателя полезного объёма сырья падают быстрее под воздействием температуры, влаги и механического воздействия насекомых [29].

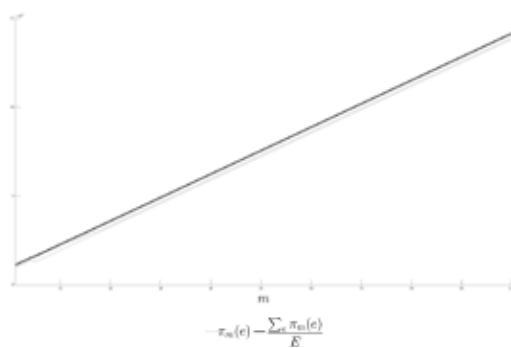


Рис. 4. Визуализация значений прибыли.
 Источник: автор с опорой на данные Предприятия и выходные данные математической модели.

1.6. В реальных условиях ограничение (12) должно в себя включать в качестве верхней оценки значение $\min(H_{km}, Q_{km})$, где Q_{km} – это спрос на товары типа k в день m , что позволит значительно уточнить решение задачи.

1.7. Нет выбора допустимости степени риска, что крайне важно в выборе стратегии формирования «сырьевого портфеля» в современных условиях.

1.8. Предприятия лесопромышленной отрасли не всегда используют в качестве источника сырья только биржу, но зачастую применяются прямые договора В2В, которые нивелируют риски – эта возможность в модели не присутствует.

2. Положительные стороны:

2.1. Для верхней оценки прибыльности производства даже масштаба крупнейших компаний лесопромышленного сектора Российской Федерации при достаточно больших значениях количества сырья, лотов и регио-



нов на бирже данная модель может быть эффективна с горизонтом планирования один год, что является самым часто встречающимся на предприятиях этой отрасли [23–26].

2.2. Концептуальная простота модели.

2.3. Возможность учёта времени в пути лота.

2.4. Наличие коэффициента полезного объёма сырья для производства.

2.5. Наличие известных методов оптимизации для задач линейного программирования [29].

Таким образом, можно утверждать, что гипотеза о существовании модели, которая позволяет оценить верхнюю оценку оптимального значения прибыли для предприятия лесопромышленной отрасли при взаимодействии с товарно-сырьевой биржей, подтверждается, и инструмент оценки может быть разработан – его пример приводится в данной статье.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе разработана модель, позволяющая определить верхнюю границу прибыли на основе имеющихся данных о распределении лотов во времени. Особенностью модели является её способность учитывать время в пути лотов и оценивать их полезный объём для последующей переработки. Учтены различные ключевые факторы лесопромышленного производства, такие как формирование цепочек поставок сырья и объёмы производства ОСБ-плит внутри предприятия, основываясь исключительно на бюджете компании.

В модели также учтена схема работы товарно-сырьевой биржи, ограничивающая покупки лотов только полными партиями. Решение модели включает в себя ежедневное производство каждого типа товара, текущее состояние бюджета, список цепочек поставок в процессе, уровень запасов сырья на складе с учетом его вместимости и резервных запасов. Формирование цепочек поставок сырья осуществляется в соответствии с принципами «just-in-time». Процесс поиска оптимального решения автоматизирован в соответствии с предварительно выбранным алгоритмом оптимизации.

С практической точки зрения, данная модель представляет интерес для топ-менеджмента лесопромышленных предприятий, которые стремятся оценить эффективность

своей деятельности. С теоретической точки зрения внесённый моделью вклад расширяет область экономико-математического раздела экономических наук, в частности, в теорию принятия решений.

Модель успешно протестирована на одном из ведущих лесоперерабатывающих предприятий Приморского края. После проведения вычислений и определения оптимального решения были сформулированы рекомендации для руководства компании относительно сотрудничества с товарно-сырьевой биржей России. В целом, проведённые расчёты позволяют делать выводы о возможности заключения рациональных сделок на товарно-сырьевой бирже России.

Для более точной оценки верхней границы прибыли представляется целесообразным внедрение дополнительных ограничений, связанных с технологическими процессами производства, допустимостью степени риска, уточнение расчётов определённых параметров (например, a_m , δ_m , β), влияющих на время в пути и рабочий объём сырья по приходу на склад, а также учёт транспортных и ресурсных рисков через возможность заключения прямых контрактов с поставщиками и введение функции спроса на конечные товары. Рассмотрены как положительные, так и отрицательные стороны предложенной модели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ghasemy, Y. R. Enhancing supply chain production-marketing planning with geometric multivariate demand function (a case study of textile industry). *Computers & Industrial Engineering*, 2020, Vol. 140 (19), 106220. DOI: 10.1016/j.cie.2019.106220.
2. Maina, J., Mwangangi, P. W. A Critical Review of Simulation Applications in Supply Chain Management. *Journal of Logistics Management*, 2020, Vol. 9, pp. 1–6. DOI: 10.5923/j.logistics.20200901.01.
3. Brintrup, A., Pak, J., Ratiney, D., Pearce, T., Wichmann, P., Woodall, P., McFarlane, D. Supply chain data analytics for predicting supplier disruptions: a case study in complex asset manufacturing. *International Journal of Production Research*, 2020, Vol. 58, pp. 3330–3341. DOI: 10.1080/00207543.2019.1685705.
4. Dominguez, R., Cannella, S. Insights on Multi-Agent Systems Applications for Supply Chain Management. *Sustainability*, 2020, Vol. 12, Iss. 5, 1935. DOI: 10.3390/su12051935.
5. Luigi, R., Stamova, I. M., Tomasiello, S. Numerical schemes and genetic algorithms for the optimal control of a continuous model of supply chains. *Applied Mathematics and Computation*, 2021, Vol. 388, 125464. DOI: 10.1016/j.amc.2020.125464.
6. El Raoui, H., Oudani, M., El Hilali Alaoui, A. Coupling Soft Computing, Simulation and Optimization in Supply Chain Applications: Review and Taxonomy. *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 31710–31732. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2973329.

7. Alkahtani, M. Mathematical Modelling of Inventory and Process Outsourcing for Optimization of Supply Chain Management. *Mathematics*, 2022, Vol 10 (7), 1142. DOI: 10.3390/math10071142.
8. Sadeghi, Z., Boyer, O., Sharifzadeh, S., Saeidi, N. A Robust Mathematical Model for Sustainable and Resilient Supply Chain Network Design: Preparing a Supply Chain to Deal with Disruptions. *Complexity*, 2021, pp. 1–17. DOI: 10.1155/2021/9975071.
9. Goodarziyan, F., Shishebori, D., Nasser, H., Dadvar, F. A bi-objective production-distribution problem in a supply chain network under grey flexible conditions. *RAIRO Operations Research*, 2021, Vol. 55, pp. 1287–1316. DOI: 10.1051/ro/2020111.
10. Taghizadeh-Yazdi, M., Farrokhi, Z., Mohammadi-Balani, A. An integrated inventory model for multi-echelon supply chains with deteriorating items: a price-dependent demand approach. *Journal of Industrial and Production Engineering*, Vol. 37, pp. 87–96. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/303876476_An_Integrated_Location-Inventory_Model_for_Supply_Chain_Network_with_Correlated_Demand. Доступ 28.05.2023.
11. Flores-Sigüenza, P., Marmolejo-Saucedo, J. A., Niembro-García, J., Lopez-Sanchez, V. M. A systematic literature review of quantitative models for sustainable supply chain management. *Mathematical biosciences and engineering: MBE*, 2021, Vol. 18, Iss. 3, pp. 2206–2229. DOI: 10.3934/mbe.2021111.
12. Escobar, J. W., Marin, A. A., Lince, J. D. Multi-objective mathematical model for the redesign of supply chains considering financial criteria optimization and scenarios. *International Journal of Mathematics in Operational Research*, 2020, Vol. 16, Iss. 2, pp. 238–256. DOI: 10.1504/IJMOR.2020.105903.
13. Fierro, L. H., Cano, R. E., García, J. I. Modelling of a multi-agent supply chain management system using Colored Petri Nets. *Procedia Manufacturing*, 2020, Vol. 42, pp. 288–295. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.095.
14. Heydari, J., Rafiei, P. Integration of environmental and social responsibilities in managing supply chains: A mathematical modeling approach. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, Vol. 145, Iss. 1, 106495. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106495.
15. Schroeder, M., Lodemann, S. A Systematic Investigation of the Integration of Machine Learning into Supply Chain Risk Management. *Logistics*, 2021, Vol. 5, Iss. 3, 62. DOI: 10.3390/logistics5030062.
16. Nishanth, B., Priyanka, S., Kannan, V., Muhammad Raheel Basha, A., Dinesh, J., Muruganandham, R., Harish, V. Mathematical modelling of supply chain under current COVID-19 business scenario with the review study on the fuzzy logic based supply chains. *European Journal of Molecular and Clinical Medicine*, 2020, Vol. 7, Iss. 2, pp. 4972–4981. [Электронный ресурс]: <https://ejmcm.com/uploads/paper/73dde990bead52540d9f9726638c2d70.pdf>. Доступ 28.05.2023.
17. Saad, E., Fathi Hafshjani, K., Radfar, R. Designing a Multi-Objective Closed-loop Supply Chain Mathematical Model with Supplier Selection Approach and considering Discount. *Engineering Management and Soft Computing*, 2022, Iss. 8 (2), pp. 43–71. [Электронный ресурс]: https://jemsc.qom.ac.ir/article_1609_dc0a78aa66f060e25ed1968d95cc9a34.pdf?lang=en. Доступ 28.05.2023.
18. Teixeira, A., Silva, E. C., Lopes, C. A mixed integer nonlinear multiperiod model for supply chain management of a company in the retail sector. *RAIRO – Operations Research*, 2021, Vol. 55, Iss. 2, pp. 997–1013. DOI: 10.1051/ro/2021048.
19. Nuñez Rodriguez, J., Andrade Sosa, H. H., Villarreal Archila, S. M., Ortiz A. System Dynamics Modeling in Additive Manufacturing Supply Chain Management. *Processes*, 2021, Vol. 9, 982. DOI: 10.3390/pr9060982.
20. Rezaei, E., Paydar, M. M., Safaei, A. S. Customer relationship management and new product development in designing a robust supply chain. *RAIRO – Operations Research*, 2020, Vol. 54, pp. 369–391. DOI: 10.1051/ro/2018107.
21. Nezamoddini, N., Gholami, A., Aqlan, F. A risk-based optimization framework for integrated supply chains using genetic algorithm and artificial neural networks. *International Journal of Production Economics*, 2020, Vol. 225, 107569. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.107569.
22. Cesarelli, G., Scala, A. E., Vecchione, D., Pongiglione, A., Guizzi, G. An Innovative Business Model for a Multi-echelon Supply Chain Inventory Management Pattern. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Vol. 1828, pp. 1–10. DOI: 10.1088/1742-6596/1828/1/012082.
23. Рогулин П. С., Мазелис Л. С. Алгоритм и математическая модель формирования устойчивых цепочек поставок древесного сырья из регионов России: сравнение и анализ // *Вестник Пермского университета. Сер. «Экономика»*. – 2020. – Т. 15. – № 3. – С. 385–404. DOI: 10.17072/1994-9960-2020-3-385-404.
24. Рогулин П. С. Моделирование перспектив взаимодействия предприятия лесопромышленного комплекса и товарно-сырьевой биржи России // *Journal of Applied Economic Research*. – 2020. – Т. 19. – № 4. – С. 489–511. DOI: 10.15826/vestnik.2020.19.4.023.
25. Рогулин П. 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.
26. Рогулин П. С. Место ИКТ и предпринимательства в формировании устойчивых цепочек поставок // *Экономическая политика*. – 2021. – Т. 16. – № 4. – С. 84–103. DOI: 10.18288/1994-5124-2021-4-84-103.
27. Рогулин П. 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.
28. Рогулин П. С. Роль информационно-коммуникационных технологий в формировании устойчивых цепочек поставок до и после пандемии covid-19 // *Journal of Applied Economic Research*. – 2021. – Т. 20. – № 3. – С. 461–488. DOI: 10.15826/vestnik.2021.20.3.019.
29. Mazelis, L., Rogulin, R. Devising a method for the formation of sustainable chains of supply of raw materials from mercantile exchange to a timber processing enterprise considering uncertainties and risks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, Vol. 5, Iss. 3 (113), pp. 6–18. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.242960. ●

Информация об авторе:

Рогулин Родион Сергеевич – кандидат экономических наук, доцент кафедры математики и моделирования Владивостокского государственного университета экономики и сервиса, Владивосток, Россия, rafassiaofusa@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 29.03.2023, одобрена после рецензирования 17.07.2023, принята к публикации 21.07.2023.

