

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ



DOI: 10.26794/2304-022X-2023-13-4-22-33

УДК 338.001.36(045)

JEL C44, C61, D24

Математическая модель поиска оптимального решения задачи по формированию цепочек поставок сырья лесопромышленных предприятий в условиях неопределенности

Р.С. Рогулин

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Владивосток, Россия

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассматриваются важные аспекты, связанные с проблемами формирования цепочек поставок и объемов производства на лесоперерабатывающих предприятиях. Основной акцент делается на вопросах оценки оптимальности принятых решений. Исследование фокусируется на предприятиях, не имеющих собственных источников сырья и стремящихся найти наиболее приемлемое решение, исходя из горизонта планирования на основе данных о сделках, реализованных на товарно-сырьевой бирже. **Цель** исследования заключается в создании математической модели, которая позволяет установить оптимальный объем производства товаров на базе формируемых цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи с учетом доли его полезного объема, времени нахождения лотов в пути и неопределенности, связанной с предложением и логистикой. В работе были использованы математическое моделирование, теория и методы оптимизации. Тестирование модели с помощью данных Санкт-Петербургской биржи и предприятий Приморского края позволило определить оптимальные траектории прибыли, объема производства и другие важные показатели. В работе также поднимаются вопросы планирования цепочек поставок и объемов производства, анализируются регионы – источники сырья и приводятся преимущества и недостатки представленной математической модели. Полученные **результаты** представляют интерес для топ-менеджмента лесопромышленных предприятий, стремящихся повысить эффективность своей деятельности, и могут явиться основой для оценки рациональности сырьевых сделок на товарно-сырьевой бирже России.

Ключевые слова: формирование цепочек поставок; объемы производства; лесоперерабатывающие предприятия; оптимальность решений; математическая модель; товарно-сырьевая биржа; доля полезного объема сырья; время лотов в пути; рациональные сырьевые сделки; повышение эффективности

Для цитирования: Рогулин Р.С. Математическая модель поиска оптимального решения задачи по формированию цепочек поставок сырья лесопромышленных предприятий в условиях неопределенности. *Управленческие науки = Management sciences*. 2023;13(4):22-33. DOI: 10.26794/2304-022X-2023-13-4-22-33

ORIGINAL PAPER

Mathematical Model for Searching for an Optimal Solution to the Problem of Forming Supply Chains for Raw Materials of Forestry Enterprises under Conditions of Uncertainty

R.S. Rogulin

Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, Russia

ABSTRACT

This paper examines important aspects related to the problems of forming supply chains and production volumes at forest processing enterprises. The main emphasis is on assessing the optimality of decisions made. The study focuses on enterprises that do not have their own sources of raw materials and that are seeking to find the most appropriate

solution based on the planning horizon based on data on transactions carried out on the commodity exchange. The **purpose** of the study is to create a mathematical model that allows us to establish the optimal volume of production of goods based on the formed supply chains of raw materials from the commodity exchange, considering the share of its useful volume, the time the lots are in transit and the uncertainty associated with supply and logistics. The following research methods were proposed: mathematical modeling, theory and optimization methods. Testing the model using data from the St. Petersburg Stock Exchange and enterprises of the Primorsky Territory made it possible to determine the optimal trajectories of profit, production volume and other important indicators. The work also raises issues of planning supply chains and production volumes, analyzes regions – sources of raw materials and presents the advantages and disadvantages of the presented mathematical model. The **results** obtained are of interest to the top management of forestry enterprises seeking to improve the efficiency of their activities and can be the basis for assessing the rationality of commodity transactions on the Russian Commodity and Raw Materials Exchange.

Keywords: formation of supply chains; production volumes; timber processing enterprises; optimality of decisions; mathematical model; commodity and raw material exchange; share of useful volume of raw materials; time of lots in transit; rational raw material transactions; efficiency improvement

For citation: Rogulin R.S. Mathematical model for searching for an optimal solution to the problem of forming supply chains for raw materials of forestry enterprises under conditions of uncertainty. *Upravlencheskie nauki = Management sciences*. 2023;13(4):22-33. DOI: 10.26794/2304-022X-2023-13-4-22-33

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современной глобальной экономики и быстроменяющейся бизнес-среды стратегически важным фактором успеха лесопромышленных компаний становится эффективное формирование цепочек поставок [от англ. Supply Chain, (SC)] сырья, управление которыми напрямую влияет на конкурентоспособность и прибыльность предприятий, поскольку сырьевая база является неотъемлемой составляющей производственного процесса.

Однако процедуре создания оптимальных SC в текущий момент противостоит ряд сложностей. Такие факторы, как колебания спроса, изменения объемов и качества сырья, транспортные ограничения и географические особенности являются причиной возникновения рисков и неопределенности. В такой ситуации требуется разработка математической модели, которая учитывала бы перечисленные обстоятельства и позволяла находить оптимальные решения.

Актуальность настоящего исследования обусловлена не только стремительными изменениями, происходящими в бизнес-среде, но и существующей необходимостью снижения издержек, повышения эффективности производства, оптимизации использования ресурсов и улучшения конкурентоспособности компаний в целом. Предлагаемая в данной статье математическая модель может стать ценным инструментом для организации процесса управления формированием цепочек поставок сырья, учитывая проблемы,

с которыми предприятия сталкиваются в своей деятельности.

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ГИПОТЕЗА ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе учитываются два этапа деятельности компаний в лесопромышленной отрасли: закупка сырья на бирже (и его доставка), а также производство определенного объема продукции на основе имеющегося запаса древесины. Необходимо пояснить, каков алгоритм поступления сырья на биржу. Она как организатор торгов заключает договоры с арендаторами участков из различных регионов, позволяя им использовать свою площадку. После оформления сделки между предприятием (заказчиком) и продавцом (участком) по переработке сырья, последнее в объеме, указанном в договоре, отправляется заказчику. Обычно предприятия получают заказы от клиентов заблаговременно и (как можно предположить) планируют свою деятельность на долгосрочный период.

Следует отметить, что спрос на продукцию лесопромышленной отрасли имеет сезонный характер, что усложняет работу компаний.

В ходе исследования была сформирована математическая модель, с помощью которой предполагалось оценить максимальную прибыль предприятия на всем планировочном горизонте.

Для достижения цели работы автором были поставлены следующие задачи:

- Обзор научной литературы по теме исследования.
- Создание экономико-математической модели для формирования SC и расчета оптимального объема производства товаров лесопромышленной отрасли с учетом уже произошедших событий, а именно:
 - распределения заказов во времени;
 - доставки партий товаров на склад предприятия.
- Анализ результатов тестирования модели.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Существующие научные работы, относящиеся к области управления цепочками поставок сырья в условиях неопределенности, часто обусловлены применением эмпирических методов и эвристических подходов, что ограничивает их точность и применимость.

Автором проанализировано значительное количество трудов, которые имеют отношение к рассматриваемым в статье проблемам. Так, А. А. Tsai и N. Agrawal оценивали цепочку поставок, состоящую из одного поставщика и двух конкурирующих розничных продавцов, уделяя особое внимание конкуренции в сфере услуг и цен; их выводы показали, что при определенных сценариях розничные продавцы выступали за усиление конкуренции [1]. Эти же авторы изучали симбиоз сотрудничества и конкуренции в цепочке поставок, включающей розничный и прямой каналы [2].

F. Bernstein и A. Federgruen описали разработку общей структуры запасов стохастического равновесия, включающей обслуживание и ценовую конкуренцию в качестве ключевых факторов [3]. D. K. Yao, S. Yue и J. Liu сосредоточились на влиянии обмена информацией на оптимальные стратегии для розничного продавца [4]. T. Xiao и D. Yang, сравнив влияние чувствительности розничных рисков на стратегии участников канала в двух разных цепочках поставок, показали, что у розничных продавцов с более высокой чувствительностью к риску оптимальные уровни обслуживания и цены ниже, а также представили структуру конкурентной цены и обслуживания, основанную на неопределенности спроса [5].

D. Wu рассмотрел обслуживание и ценообразование в различных каналах, где уровни обслуживания могут корректироваться обеими сторонами (и продавцами, и торговцами) либо последователь-

но, либо одновременно [6]. С. Н. Wu исследовал двухуровневую SC, изучил влияние сервисной и ценовой конкуренции между известными производителями и теми, кто внедряет новые продукты, и показал, что степень этой конкуренции обуславливает затраты на переработку и инвестирование в услуги (особенно для производителей, внедряющих новые продукты) [7].

S. Rezapour и R. Z. Farahani представили двухуровневую модель цепочки поставок, учитывающую конкуренцию цен и уровень обслуживания розничных продавцов [8]. Авторы исследования [9] проанализировали модель SC, подверженную перебоям спрос, а Z. Pi, W. Fang и B. Zhang при оценке двухканальной модели применили подходы из теории игр для достижения равновесия Штакельберга-Нэша, поскольку два конкурирующих розничных продавца и поставщик поставляли продукт через прямой онлайн-канал [10].

Авторы работы [11] рассмотрели распространение одного продукта одним производителем среди нескольких розничных продавцов внутри SC, сосредоточив внимание на пополнении и ценовой политике, основанной на конкуренции Бертрана и Курно; далее ученые дополнили свои исследования, включив в них поведение ритейлеров в отношении конкуренции и сотрудничества [12]. K. Chen and T. Xiao разработали модель цепочки поставок, основанную на неопределенности спроса, с децентрализованной структурой, включающую одного поставщика и несколько конкурирующих розничных продавцов, а также форму контрактов, позволяющую SC демонстрировать централизованное поведение [13]. G. P. Cachon нашел приближенное решение проблемы инвентаризации в двухуровневой модели SC с одним производителем и несколькими розничными торговцами, где последние могли конкурировать или сотрудничать [14]. Коллектив ученых в [15] проанализировал децентрализованные и централизованные модели цепочки поставок и представил модель, в которой рассматривается один поставщик и несколько дифференцированных розничных торговцев, подчеркнув, что первый стремится максимизировать количество последних [16].

Многочисленные исследования посвящены вопросам управления запасами [17–36]. Их авторы оценивают координацию и совместное использование запасов между розничными торговцами в SC с независимым определением количества

заказов и совместным распределением запасов [22]; строят модели цепочек поставок как с децентрализованной структурой (один производитель-монополист и несколько зависимых розничных продавцов) [32], так и с одним производителем и двумя розничными торговцами [33].

Из вышесказанного следует, что проблемы управления цепочками поставок в контексте товарно-сырьевых бирж являются актуальными и подробно описанными в большом количестве научных трудов. Однако важно отметить такие особенности изучения этих вопросов, как относительно небольшое внимание, уделяемое условиям неопределенности и рисков, возникающим, в частности, на товарно-сырьевых биржах. Обычно сырьевые сделки происходят в формате В 2В (напрямую между продавцами и покупателями). Однако в лесной отрасли, особенно в России, многие компании продолжают работать вне официальной системы и уклоняются от уплаты налогов. В результате процесс установления связей между покупателями и продавцами может занимать много времени, что ограничивает потенциальное число клиентов и влияет на цены на сырье, а также создает убытки для национального бюджета, который не получает достаточного объема налоговых доходов. Использование инструментов товарно-сырьевых бирж будет способствовать прозрачности сделок и увеличению числа потенциальных клиентов у продавцов, поскольку даже иностранные компании, нуждающиеся в сырье, смогут обращаться к последним без необходимости поиска прямого контакта. Это в итоге приведет к конкурентоспособным ценам и более эффективной реализации сырья.

В тематической литературе обычно изучаются вопросы, имеющие отношение к управлению цепями поставок. В этих работах описываются математические модели, которые помогают эффективно формировать SC с учетом особенностей отрасли, а также исследуются проблемы менеджмента, связанные с организацией производства и созданием цепей поставок. Часто используются базовые подходы, такие как Lean Logistics (от англ. бережливая логистика)¹, Six Sigma (от англ. шесть

сигм)² и др. Однако в научных источниках мало освещен вопрос анализа возможной прибыли в ситуации неопределенности, хотя эта задача полезна для оценки эффективности ИТ-решений и качества менеджмента. Особенностью лесопромышленной отрасли является уменьшение объема древесины при транспортировке, и это свойство сырья требуется учитывать при разработке производственного плана и цепочек поставок до склада предприятия.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Любое производство, будь то лесопромышленное или иное, не может функционировать без нужного запаса сырья. В работе используются данные о его продаже, предоставляемые Санкт-Петербургской международной товарно-сырьевой биржей³ (далее — биржа), которые присутствуют в открытом доступе. Каждый день на сайте биржи публикуется информация о количестве сделок, ценах и объеме проданного сырья. Она предоставляет услуги по доставке сырья до потребителя (которые включены в стоимость сырья) из множества регионов, так что у покупателя имеется возможность выбора. Согласно правилам работы биржи приобрести можно только весь лот сырья целиком. Лесопромышленное производство организовано следующим образом: сырье доставляется на склад, затем его перерабатывают в труху и прессуют в плиты ОСБ⁴, т.е. в готовую продукцию. Каждому типу сырья соответствуют определенные плиты ОСБ. Перевозка плит осуществляется железнодорожным транспортом (в том числе по Транссибирской магистрали) за счет отправителя, который включает все расходы за доставку лота в цену продукции.

Прежде чем перейти к описанию модели, введем следующие обозначения параметров и переменных.

² Шесть Сигм (от англ. Six Sigma) — методика настройки бизнес-процессов на снижение всех типов дефектов, потерь и издержек.

³ Санкт-Петербургская международная товарно-сырьевая биржа (СПбМТСБ) (официальный сайт). URL: <https://spimex.com/markets/wood/trades/results/>

⁴ Ориентированно-стружечная плита (ОСБ) — многослойный (3–4 и более слоев) лист, состоящий из древесной стружки (тонких щепок).

¹ Бережливая логистика (от англ. Lean Logistics) — вытягивающая система, включающая в себя все организации в потоке создания ценности для конечного клиента, когда пополнение запасов происходит по потребности внутреннего и внешнего потребителя небольшими партиями.

Параметры:

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

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

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

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

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

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

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

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

B_0 — начальный бюджет;

FC — постоянные издержки;

M — горизонт планирования;

$T_{r\tilde{m}}$ — время, за которое выкупленный в день $\tilde{m}$ лот из региона r дойдет 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 значения случайной величины, распределенной 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 $\{V_{ilrm}(e), c_{ilrm}(e), T_{r\tilde{m}}(e)\}$.

Переменные:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

где $\tilde{m} = m - T_{r\tilde{m}}$.

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

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

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

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

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

Поясним, что в выражениях (2) и (7) значения $V_{ilr(m-T_{r\tilde{m}})}$ записываются в систему ограничений тогда и только тогда, когда выполняется условие $\tilde{m} = m - T_{r\tilde{m}}$.

Задача $F^{(1,1)}(e)$ решается для всех $e = 1 : E$.

Рассмотрим выражения (1–12) подробнее. Целевая функция (1) направлена на получение максимального значения прибыли в последний день горизонта планирования. Уровень запаса сырья в день m рассчитывается по формуле (2), исходя из затраченного объема сырья на производство $\sum_k A_{lk} x_{km}$, запаса сырья на конец предыдущего дня b_{lm-1} , а также поступившего на склад количества сырья в текущий день с поправкой на время в пути $\tilde{m}$ и, соответственно, на долю полезного объема сырья $\gamma_{\tilde{m}m}$.

Объем производства (3) имеет только целые и неотрицательные значения. Факт принятия решения по вопросу покупки лота задается соотношением (4). Объем сырья на складе ограничен значением максимальной вместимости склада (5) сверху и (6) — снизу, так как эта величина не может иметь отрицательного значения. Любое предприятие располагает определенным бюджетом, за пределы которого ему нельзя выходить (7). Время в пути каждой заявки рассчитывается из соотношений (8–9). В формуле (9) было введено допущение, что случайная величина расстояния, проходимого лотом в день t , имеет логнормальное распределение. Это обусловлено сезонностью железнодорожных перевозок, посредством которых продукция доставляется на склад покупателя. С этими данными можно детально ознакомиться в работах [25, 27, 29].

Коэффициент полезного объема сырья задается формулами (10)–(11). Положим, что $\varepsilon^{(1)}$ имеет равномерное распределение, так как нет оценок того, как именно изменяется во времени рабочий объем сырья. Количество производимых товаров (12) также ограничено сверху по физическим причинам.

Как следует из описания модели $F^{(1,1)}(e)$, она является задачей нелинейного и стохастического программирования. Для ее решения необходимо рассмотреть алгоритм, а именно:

Разыграть значения (8)–(9) и γ_{mm} с учетом (11).

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

КАЛИБРОВКА

Тестирование модели было проведено на основе данных, с одной стороны, полученных на предприятии ООО «ДНС-Лес»⁵, расположенном в г. Спасске-Дальнем Приморского края, с другой стороны — сгенерированных авторами.

Рассмотрим, как были сгенерированы данные, связанные с распределением лотов во времени. Для этого использовалась информация с сайта биржи за 120 дней начиная с 01.02.2021. Каждые 30 дней происходил расчет математического ожидания и дисперсии количества заявок, объемов сырья в каждой из них и средней цены на 1 м³.

Далее по нормальному закону с вычисленными характеристиками были сформированы E наборов данных. Остальные значения параметров логистики и производственных процессов $(\bar{b}, b, B_0, FC, a_m, \delta_m, \beta, L_r)$ были получены на выше-названном предприятии в соответствии с его оценками.

Для определенности будем использовать следующие параметры: $K = 4$ (типы товаров); $M = 100$ дней (длина горизонта планирования); $L = 2$ (типы сырья); $R = 4$ (количество регионов); $0 \leq I \leq 6$ (количество лотов каждый день в диапазоне); $E = 400$ (количество различных наборов входных параметров).

Биржа представлена четырьмя регионами: Иркутская область ($r = 1$), Пермский край ($r = 2$), Республика Бурятия ($r = 3$), Московская область ($r = 4$). Горизонт планирования лежит в интервале между 1 февраля 2021 г. и серединой мая 2021 г.

Основные входные данные, характеризующие предприятие, представлены в табл. 1, 2.

Для проведения вычислений воспользуемся высокоуровневым языком программирования Matlab и встроенной функцией `Intlinprog`⁶ для поиска решений задач смешанно-целочисленной линейной оптимизации. Эта функция использует алгоритм ветвей и границ.

ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим рис. 1. На нем изображены объемы товаров, производимые каждый день (с 1-го по 100-й день). Серым цветом обозначены объемы производства каждого отдельного набора данных e , черным — среднее значение. Несмотря на более высокую цену на товары 3 и 4, результаты расчетов показывают, что наиболее часто выпускаемыми являются товары 1 и 2 типа. Однако, как видно из показателя средних значений, почти всегда производятся все товары.

На рис. 2 изображены показатели прибыли $\pi_m(e)$, получаемой каждый день (с 1-го по 100-й день). Серым цветом обозначены объемы прибыли для каждого отдельного набора данных e , черным — их среднее значение.

Как следует из рис. 2, наиболее финансово сложный период (с точки зрения управленческого под-

⁵ ООО «ДНС-Лес» (официальный сайт). URL: <http://dns-les.ru/>

⁶ Сайт MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html>

Таблица 1 / Table 1

Основные входные параметры предприятия / Main input parameters of the enterprise

Параметр / Option	Значение / Value
$\forall m > 0 : p_{km}, k = 1 : K, \text{руб.}$	$(1.1, 49.1, 61.1, 71) * 10^4$
$\bar{b}, \text{м}^3$	3000
$\underline{b}, \text{м}^3$	21
$B_0, \text{руб.}$	$3,01 * 10^6$
$left(m), \text{у.е.}$	$-\frac{100}{m * 10^5}$
$right(m), \text{у.е.}$	$\frac{100}{m * 10^5}$
$\forall m, k > 0 : H_{km}$	4
$L_r, r = 1 : R, \text{км}$	$(3741, 7561, 3251, 9021)$

Источник / Source: составлено автором по данным ООО «ДНС-Лес». URL: <http://dns-les.ru/>; СП6МТСБ. URL: <https://spimex.com/markets/wood/trades/results/> / compiled by the author based on LLC "DNS-Les" data. URL: <http://dns-les.ru/>; SPIMEX. URL: <https://spimex.com/markets/wood/trades/results/>

Таблица 2 / Table 2

Затраты сырья на производство единицы товара, м³ / Cost of raw materials for the production of a unit of good, m³

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

Источник / Source: составлено автором по данным ООО «ДНС-Лес». URL: <http://dns-les.ru/> / compiled by the author based on LLC "DNS-Les" data. URL: <http://dns-les.ru/>

хода) приходится на интервал с 40-го по 60-й день планирования — об этом можно говорить, исходя из почти стабилизированного и неизменного значения показателя прибыли при оптимальном решении.

Рассмотрим положительные и отрицательные стороны полученной модели.

Отрицательные стороны:

1. На реальном производстве в ходе планирования едва ли можно представить себе ситуацию, когда менеджеры, ответственные за принятие решений, могут знать практическое распре-

ление лотов во времени со всеми их характеристиками. Поэтому важно:

а) собирать данные, связанные с поставленной задачей, за большой промежуток времени; однако, во-первых, на сайте биржи доступна информация лишь начиная 2010-х гг., во-вторых, сайт биржи защищен технологией антибот, чтобы снизить нагрузку на сайт в случае, если считывание данных будет происходить с применением ботов, что крайне усложняет процесс формирования достаточного объема выборки для анализа. Стоит

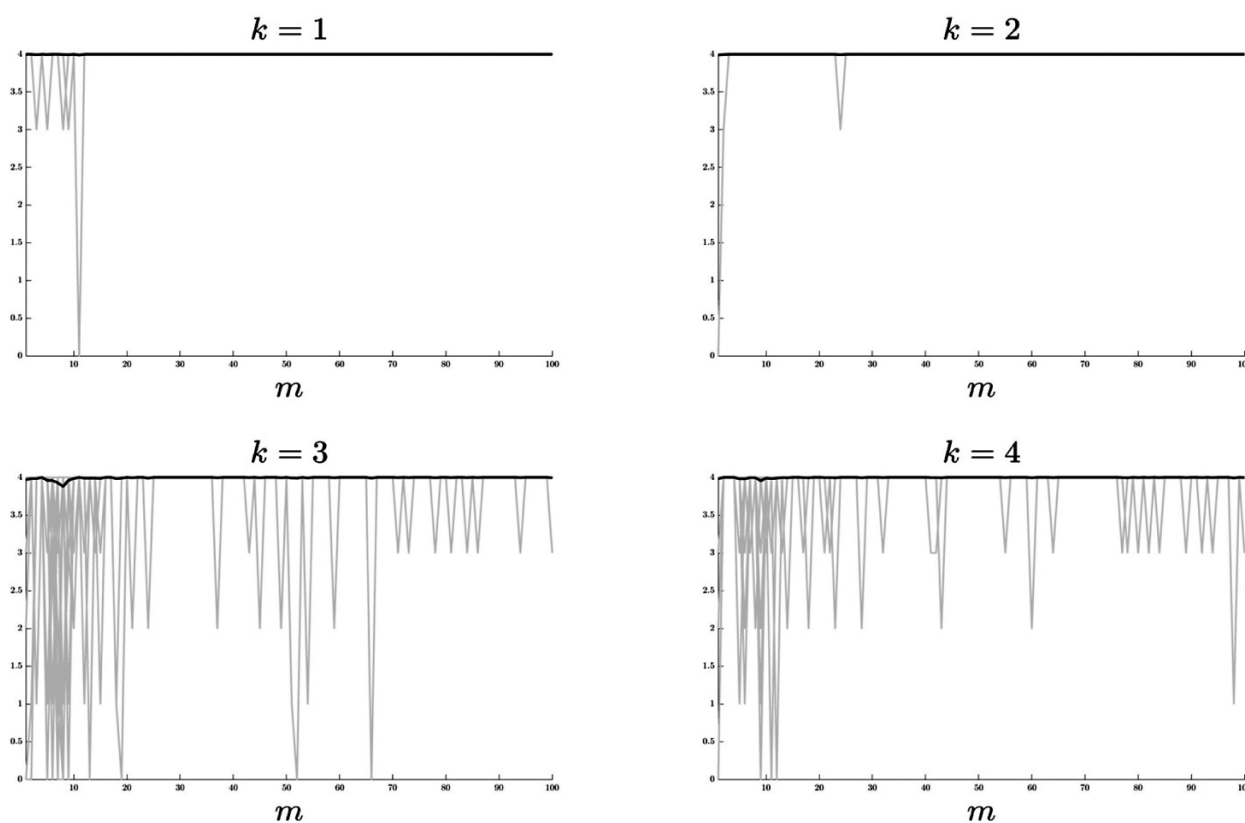


Рис. 1 / Fig. 1. Визуализация объемов производства / Visualization of production volumes

Источник / Source: разработано авторами / developed by the authors.

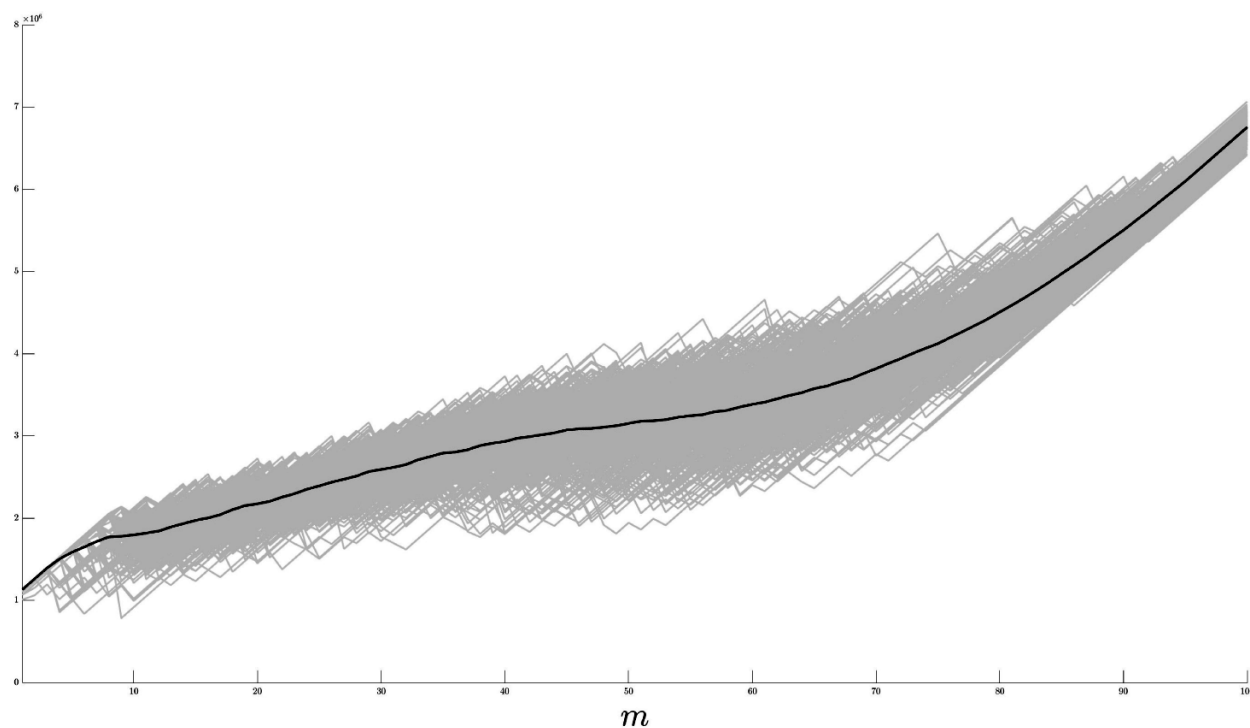


Рис. 2 / Fig. 2. Визуализация значений прибыли / Visualization of profit values

Источник / Source: разработано авторами / developed by the authors.

отметить, что с течением времени эта проблема становится менее актуальной, так как растет объем отчетов по совершенным сделкам.

б) строить сложные математические модели для максимального точного прогноза распределения заявок во времени. Однако давно известно, что прогнозировать ситуации на биржах — непростая задача, поскольку по мере допуска на них частных инвесторов (в контексте текущей задачи — мелких предприятий) растет влияние настроений, а последние очень плохо поддаются прогнозированию. Исходя из этого обстоятельства резко увеличивается актуальность развития методов прогнозирования ситуаций не только на биржах ценных бумаг, но и на сырьевых.

2. Быстрорастущее количество ограничений из-за линейности модели [24].

3. Для каждого дня необходимо знать параметры a_m, δ_m , которые могут меняться с течением времени.

4. Не существует четкого объяснения допустимости использования логнормального распределения величины пройденного лотом расстояния.

5. Параметр β также должен изменяться во времени, потому что летом полезный объем сырья уменьшается быстрее под воздействием температуры, влаги и механического воздействия насекомых [29].

6. В реальных условиях ограничение (12) должно 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 конкретизировать решение задачи.

7. Модель не предполагает выбор допустимости степени риска, что крайне важно при определении стратегии формирования «сырьевого портфеля» в современных условиях.

8. Предприятия лесопромышленной отрасли не всегда используют в качестве источника сырья только биржу — зачастую заключаются прямые договоры В 2В, которые нивелируют риски. Этой возможности в модели не предусмотрено.

Положительные стороны:

1. Для верхней оценки прибыльности производства (даже такого масштаба, как круп-

нейшая компания лесопромышленного сектора РФ — ПАО «Сегежа»⁷) при достаточно больших значениях количества сырья, лотов и регионов на бирже данная модель может быть эффективна с горизонтом планирования 1 год, наиболее часто встречающимся на предприятиях этой отрасли [23–26].

2. Концептуальная простота модели.

3. Заложенная в ней возможность учета времени лота в пути.

4. Наличие коэффициента полезного объема сырья для производства.

5. Присутствие известных методов оптимизации для задач линейного программирования [29].

ВЫВОДЫ

Разработанная модель определяет верхнюю границу прибыли предприятия лесопромышленной отрасли и учитывает время лотов в пути и их полезный объем; она позволяет формировать цепочки поставок сырья и объемы производства, используя бюджет предприятия и политику just-in-time (от англ. точно в срок). Структура модели охватывает производство, состояние бюджета, цепочки поставок и уровень запасов — она полезна для топ-менеджмента предприятий лесопромышленной отрасли и дополняет экономико-математическую теорию принятия решений.

Апробация модели на лесоперерабатывающем предприятии позволила сформулировать рекомендации по сотрудничеству с товарно-сырьевой биржей. Анализ показал, что покупка сырья в Московской области и Пермском крае может быть целесообразной, несмотря на близость других регионов. Однако сырье из Иркутской области и Республики Бурятия рекомендуется приобретать только в определенных условиях. Расчеты подтверждают возможность рациональных сырьевых сделок на бирже России.

⁷ ПАО «Сегежа Групп» (официальный сайт). URL: <https://segezha-group.com/about/>

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Tsay A. A., Agrawal N. Channel dynamics under price and service competition. *Manufacturing & Service Operations Management*. 2000;2(4):372–391. DOI: 10.1287/msom.2.4.372.12342
2. Tsay A. A., Agrawal N. Channel conflict and coordination in the e-commerce age. *Production and Operations Management*. 2004;13(1):93–110. DOI: 10.1111/j.1937-5956.2004.tb00147.x

3. Bernstein F., Federgruen A. A general equilibrium model for industries with price and service competition. *Operations Research*. 2004;52(6):868–886. DOI: 10.1287/opre.1040.0149
4. Yao D.-Q., Yue X., Liu J. Vertical cost information sharing in a supply chain with value-adding retailers. *Omega*. 2008;36(5):838–851. DOI: 10.1016/j.omega.2006.04.003
5. Xiao T., Yang D. Price and service competition of supply chains with risk-averse retailers under demand uncertainty. *International Journal of Production Economics*. 2008;114(1):187–200. DOI: 10.1016/j.ijpe.2008.01.006
6. Wu D. Joint pricing-servicing decision and channel strategies in the supply chain. *Central European Journal of Operations Research*. 2011;19(1):99–137. DOI: 10.1007/s10100-009-0133-z
7. Wu C.-H. Price and service competition between new and remanufactured products in a two-echelon supply chain. *International Journal of Production Economics*. 2012;140(1):496–507. DOI: 10.1016/j.ijpe.2012.06.034
8. Rezapour S., Farahani R.Z. Supply chain network design under oligopolistic price and service level competition with foresight. *Computers & Industrial Engineering*. 2014;72:129–142. DOI: 10.1016/j.cie.2014.03.005
9. Ali S.M., Rahman M.H., Tumpa T.J., Rifat A.A.M., Paul S.K. Examining price and service competition among retailers in a supply chain under potential demand disruption. *Journal of Retailing and Consumer Services*. 2018;40:40–47. DOI: 10.1016/j.jretconser.2017.08.025
10. Pi Z., Fang W., Zhang B. Service and pricing strategies with competition and cooperation in a dual-channel supply chain with demand disruption. *Computers & Industrial Engineering*. 2019;138:106130. DOI: 10.1016/j.cie.2019.106130
11. Bernstein F., Federgruen A. Pricing and replenishment strategies in a distribution system with competing retailers. *Operations Research*. 2003;51(3):409–426. DOI: 10.1287/opre.51.3.409.14957
12. Bernstein F., Federgruen A. Decentralized supply chains with competing retailers under demand uncertainty. *Management Science*. 2005;51(1):18–29. DOI: 10.1287/mnsc.1040.0218
13. Chen K., Xiao T. Pricing and replenishment policies in a supply chain with competing retailers under different retail behaviors. *Computers & Industrial Engineering*. 2017;103:145–157. DOI: 10.1016/j.cie.2016.11.018
14. Cachon G.P. Stock wars: Inventory competition in a two-echelon supply chain with multiple retailers. *Operations Research*. 2001;49(5):658–674. DOI: 10.1287/opre.49.5.658.10611
15. Anderson E.J., Bao Y. Price competition with integrated and decentralized supply chains. *European Journal of Operational Research*. 2010;200(1):227–234. DOI: 10.1016/j.ejor.2008.11.049
16. David A., Adida E. Competition and coordination in a two-channel supply chain. *Production and Operations Management*. 2015;24(8):1358–1370. DOI: 10.1111/poms.12327
17. Adida E., DeMiguel V. Supply chain competition with multiple manufacturers and retailers. *Operations Research*. 2011;59(1):156–172. DOI: 10.1287/opre.1100.0863
18. Konur D., Geunes J. Supplier wholesale pricing for a retail chain: implications of centralized vs. decentralized retailing and procurement under quantity competition. *Omega*. 2016;65:98–110. DOI: 10.1016/j.omega.2016.01.002
19. Shenoy P.P. Competitive inventory models. *RAIRO — Operations Research*. 1987;21(1):1–19. URL: http://www.numdam.org/article/RO_1987__21_1_1_0.pdf
20. Yang S.-L., Zhou Y.-W. Two-echelon supply chain models: Considering duopolistic retailers' different competitive behaviors. *International Journal of Production Economics*. 2006;103(1):104–116. DOI: 10.1016/j.ijpe.2005.06.001
21. Zhang P., He Y., Shi C.V. Transshipment and coordination in a two-echelon supply chain. *RAIRO — Operations Research*. 2017;51(3):729–747. DOI: 10.1051/ro/2016052
22. Yan X., Zhao H. Inventory sharing and coordination among n independent retailers. *European Journal of Operational Research*. 2015;243(2):576–587. DOI: 10.1016/j.ejor.2014.12.033
23. Рогулин Р.С., Мазелис Л.С. Алгоритм и математическая модель формирования устойчивых цепочек поставок древесного сырья из регионов России: сравнение и анализ. *Вестник Пермского университета. Серия: Экономика*. 2020;15(3):385–404. DOI: 10.17072/1994-9960-2020-3-385-404

- Rogulin R. S., Mazelis L. S. Algorithm and mathematical model of supply chain management for raw wood from the regions in Russia: Comparison and analysis. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Ekonomika = Perm University Herald. Economy*. 2020;15(3):385–404. (In Russ.). DOI: 10.17072/1994–9960–2020–3–385–404
24. Рогулин Р. С. Моделирование перспектив взаимодействия предприятия лесопромышленного комплекса и товарно-сырьевой биржи России. *Journal of Applied Economic Research*. 2020;19(4):489–511. DOI: 10.15826/vestnik.2020.19.4.023
Rogulin R. S. Modeling of promising interaction between a timber industry enterprise and a commodity exchange in Russia. *Journal of Applied Economic Research*. 2020;19(4):489–511. (In Russ.). DOI: 10.15826/vestnik.2020.19.4.023
 25. Рогулин Р. С. Модель оптимизации плана закупок сырья из регионов России лесоперерабатывающим комплексом. *Бизнес-информатика*. 2020;14(4):19–35. DOI: 10.17323/2587–814X.2020.4.19.35
Rogulin R. S. A model for optimizing plans for procurement of raw materials from regions of Russia in a timber-processing enterprise. *Business Informatics*. 2020;14(4):19–35. DOI: 10.17323/2587–814X.2020.4.19.35 (In Russ.: *Biznes-informatika*. 2020;14(4):19–35. DOI: 10.17323/2587–814X.2020.4.19.35).
 26. Рогулин Р. С. Место ИКТ и предпринимательства в формировании устойчивых цепочек поставок. *Экономическая политика*. 2021;16(4):84–103. DOI: 10.18288/1994–5124–2021–4–84–103
Rogulin R. S. The place of ICT and entrepreneurship in forming sustainable supply chains. *Ekonomicheskaya politika = Economic Policy*. 2021;16(4):84–103. (In Russ.). DOI: 10.18288/1994–5124–2021–4–84–103
 27. Рогулин Р. С. Математическая модель формирования ценовой политики и плана производственно-транспортной системы лесопромышленного предприятия. *Бизнес-информатика*. 2021;15(3):60–77. DOI: 10.17323/2587–814X.2021.3.60.77
Rogulin R. S. A mathematical model for the formation of the pricing policy and the plan of the production and transport system in a timber-processing enterprise. *Business Informatics*. 2021;15(3):60–77. (In Russ.: *Biznes-informatika*. 2021;15(3):60–77. DOI: 10.17323/2587–814X.2021.3.60.77).
 28. Рогулин Р. С. Роль информационно-коммуникационных технологий в формировании устойчивых цепочек поставок до и после пандемии COVID-19. *Journal of Applied Economic Research*. 2021;20(3):461–488. DOI: 10.15826/vestnik.2021.20.3.019
Rogulin R. S. The role of ICT and entrepreneurship in forming sustainable supply chains: Before and after the COVID-19 pandemic. *Journal of Applied Economic Research*. 2021;20(3):461–488. (In Russ.). 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;5(3–113):6–18. DOI: 10.15587/1729–4061.2021.242960
 30. Тарасов В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М.: Эдиториал УРСС; 2002. 352 с.
Tarasov V. B. From multi-agent systems to intelligent organizations: Philosophy, psychology, computer science. Moscow: Editorial URSS; 2002. 352 p. (In Russ.).
 31. Канторович Л. В. Математические методы организации и планирования производства. Л.: ЛГУ; 1939. 96 с.
Kantorovich L. V. Mathematical methods of organizing and planning production. Leningrad: Leningrad State University; 1939. 96 p. (In Russ.).
 32. Shao J., Krishnan H., McCormick S. T. Incentives for transshipment in a supply chain with decentralized retailers. *Manufacturing & Service Operations Management*. 2011;13(3):361–372. DOI: 10.1287/msom.1110.0326
 33. Huang H., Ke H., Wang L. Equilibrium analysis of pricing competition and cooperation in supply chain with one common manufacturer and duopoly retailers. *International Journal of Production Economics*. 2016;178:12–21. DOI: 10.1016/j.ijpe.2016.04.022

34. Glock C.H., Kim T. The effect of forward integration on a single-vendor-multi-retailer supply chain under retailer competition. *International Journal of Production Economics*. 2015;164:179–192. DOI: 10.1016/j.ijpe.2015.03.009
35. Chen K., Xiao T. Pricing and replenishment policies in a supply chain with competing retailers under different retail behaviors. *Computers & Industrial Engineering*. 2017;103:145–157. DOI: 10.1016/j.cie.2016.11.018
36. Karimi M., Khademi-Zare H., Zare-Mehrjerdi Y., Fakhrazad M.B. Optimizing service level, price, and inventory decisions for a supply chain with retailers' competition and cooperation under VMI strategy. *RAIRO — Operations Research*. 2022;56(2):1051–1078. DOI: 10.1051/ro/2022039

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / ABOUT THE AUTHOR



Родион Сергеевич Рогулин — кандидат экономических наук, доцент кафедры «Математики и моделирования», Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Владивосток, Россия

Rodion S. Rogulin — Cand. Sci. (Econ.), Associated Professor at the Department of Mathematics and Modeling, Vladivostok, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-3235-6429>

rafassiaofusa@mail.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest Statement: The author has no conflicts of interest to declare.

Статья поступила в редакцию 17.05.2023; после рецензирования 19.07.2023; принята к публикации 16.11.2023.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Article was submitted on 17.05.2023, revised on 19.07.2023, and accepted for publication on 16.11.2023.

The author read and approved the final version of the manuscript