

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ЦЕПОЧЕК ПОСТАВОК СЫРЬЯ И ОБЪЕМОВ ПРОИЗВОДСТВА С ТЕХНОЛОГИЕЙ РАСКРОЯ НА ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Р.С. Рогулин

ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет», Россия, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, д. 41

rafassiaofusa@mail.ru

Рассмотрены важные аспекты, связанные с проблемами формирования цепочек поставок и объемов производства на лесоперерабатывающих предприятиях с наиболее часто встречающейся технологией производства — раскрой поступающего сырья. Основной акцент делается на проблеме оценки оптимальности принятых решений. Исследование фокусируется на лесопромышленных предприятиях без собственных источников сырья, которые стремятся найти оптимальное решение в конце горизонта планирования на основе данных о реализованных сделках на товарно-сырьевой бирже. Разработана математическая модель, учитывающая технологию раскроя поступающего сырья, время лотов в пути и факторы неопределенности. Тестирование модели на данных биржи и предприятия в Приморском крае позволило определить оптимальную траекторию прибыли, объема производства и других важных показателей. Рассмотрены вопросы планирования цепочек поставок и объемов производства. Проанализированы регионы — источники сырья. Приведены преимущества и недостатки представленной математической модели. Показано, что разработанная модель может служить основой для рациональных сырьевых сделок и представлять интерес для топ-менеджмента лесопромышленных предприятий, стремящегося повысить эффективность их деятельности.

Ключевые слова: формирование цепочек поставок, объемы производства, лесоперерабатывающие предприятия, математическая модель, доля полезного объема сырья, время лотов в пути

Ссылка для цитирования: Рогулин Р.С. Математическая модель оптимального формирования цепочек поставок сырья и объемов производства с технологией раскроя на лесопромышленных предприятиях // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 6. С. 139–148. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-6-139-148

Современные вызовы и возможности управления цепочками поставок сырья.

В условиях глобальной экономики и быстроизменяющейся бизнес-среды эффективное формирование цепочек поставок сырья становится стратегически важным фактором для успешной деятельности лесопромышленных предприятий. Для этих предприятий сырьевая база является неотъемлемой составляющей производственного процесса, и эффективное управление цепочками поставок сырья оказывает прямое влияние на их конкурентоспособность и прибыльность.

Формирование устойчивых цепочек поставок сырья сталкивается с некоторыми сложностями, особенно при наличии факторов неопределенности. Изменения спроса, колебания объемов и скачки качества сырья, транспортные ограничения и географические особенности — факторы, создающие условия неопределенности и риска для принятия решений. Такая ситуация обусловила необходимость разработки математической модели, которая бы учитывала все эти факторы и обеспечивала поиск оптимальных решений по формированию цепочек поставок сырья.

Стремление к снижению издержек, повышению эффективности производства, оптимизации использования ресурсов и улучшению общей конкурентоспособности предприятий наряду с быстрыми изменениями в бизнес-среде обусловили актуальность данного исследования.

Представленная математическая модель может стать ценным инструментом при принятии решений в области формирования цепочек поставок сырья с учетом сложностей и факторов неопределенности, с которыми предприятия регулярно сталкиваются при осуществлении деятельности.

Исследования в области управления цепочками поставок сырья в условиях неопределенности часто ограничены применением эвристических подходов и эмпирических методов, поскольку их точность и применимость в динамичной среде с постоянно изменяющимися условиями достаточно сомнительна.

В связи с этим разработанная математическая модель, основанная на оптимизационных методах, может служить важным шагом в направлении обеспечения эффективности формирования цепочек поставок сырья на лесопромышленные предприятия.

Разработанная математическая модель предоставляет предприятиям более точные инструменты управления цепочками поставок сырья и позволит оптимизировать его использование, что будет способствовать повышению конкурентоспособности предприятий и их адаптации к быстро изменяющимся условиям на мировом рынке. Кроме того, математическая модель учитывает разнообразные сценарии и помогает принять более обоснованное решение с учетом всех факторов неопределенности.

Эффективное управление цепочками поставок сырья является ключевым фактором для успешной деятельности лесопромышленных предприятий в современных условиях, а разработка математических моделей, способных решать задачи при наличии фактов неопределенности, откроет новые горизонты для оптимизации и повышения эффективности производства, тем самым укрепит позиции предприятий на рынке и обеспечит их долгосрочную устойчивость.

Обзор литературы. В сфере управления цепями поставок проведено множество исследований. В работе [1] рассмотрена цепь поставок, состоящая из одного поставщика и двух конкурирующих розничных продавцов, обращено внимание на конкуренцию в сфере услуг и в ценовой политике. В ней также отмечается, что в определенных сценариях конкурирующие розничные продавцы призывают к усилению конкуренции.

Другое исследование [2] посвящено взаимодействию сотрудничества и конкуренции в цепи поставок, включающей розничный и прямой каналы.

Авторы работы [3] разработали общую модель стохастического равновесия в запасах, включая обслуживание и конкуренцию в ценообразовании в качестве ключевых факторов.

Совместное исследование [4] сфокусировано на влиянии обмена информацией на оптимальные стратегии для розничных продавцов, предоставляющих услуги с добавленной стоимостью.

Группа ученых в работе [5] сравнила влияние чувствительности розничных рисков на стратегии участников канала поставок в двух различных цепях. Ими подробно рассмотрена структура конкуренции в политике ценообразования и обслуживания, основанной на неопределенности спроса, а также показано, что розничные продавцы с более высокой чувствительностью к риску имеют более низкие оптимальные уровни обслуживания и розничные цены.

В дополнительном исследовании [6] оценены общие стратегии обслуживания и ценообразования в различных каналах поставок, в которых розничные продавцы могут корректировать уровень обслуживания последовательно или одновременно.

Автор работы [7] исследовал двухуровневую цепь поставок по влиянию обслуживания и ценовой конкуренции между известными производителями и производителями, внедряющими новые продукты. Он отметил, что уровень ценовой и сервисной конкуренции оказывает влияние на затраты на переработку и инвестиции в услуги, особенно для производителей, внедряющих новые продукты.

В работе [8] авторы представили двухуровневую конкурентную модель цепи поставок, с учетом конкуренции по ценам и по уровню обслуживания.

Автор исследования [9] провел анализ цепи поставок, подверженной колебаниям спроса, в которой несколько конкурирующих розничных продавцов реализовали стратегии ценообразования и обслуживания.

Коллектив ученых в работе [10] оценил двухканальную модель цепи поставок, также подверженную колебаниям спроса, с акцентом на сотрудничество розничных продавцов и конкуренцию в области политики обслуживания и цен. В этом исследовании использованы методы теории игр для достижения равновесия как по Штакельбергу, так и по Нэшу, поскольку два конкурирующих розничных продавца и поставщик предлагали продукт через прямой онлайн-канал.

Автор работы [11] исследовал распространение одного продукта одним производителем среди нескольких розничных продавцов в рамках цепи поставок, обращая внимание на пополнение прибыли и ценовую политику, основанную на конкуренции по моделям Бертрана и Курно. Затем авторы расширили область исследований, в частности поведения ритейлеров в отношении конкуренции и сотрудничества [12].

В работе [13] авторы представили модель цепи поставок, основанную на неопределенности спроса, с децентрализованной структурой, включая одного поставщика и несколько конкурирующих розничных продавцов. Они представили модель контрактов, позволяющую цепи поставок демонстрировать децентрализованное поведение.

Авторы работы [14] нашли приближенное решение задачи инвентаризации в двухуровневой модели цепи поставок с одним производителем и несколькими розничными продавцами, согласно которой они могли конкурировать или сотрудничать.

Коллектив ученых в работе [15] проанализировал децентрализованные и централизованные модели цепей поставок с акцентом на ценовую конкуренцию. Они представили модель цепи поставок с одним поставщиком и несколькими дифференцированными розничными продавцами, указав, что поставщики стремятся максимизировать количество розничных продавцов [16].

Приведенные исследования представляют собой важный вклад в понимание сложных взаимосвязей в управлении цепями поставок и улучшение стратегий участников рынка, обеспечивая лучшую адаптацию к современным быстроизменяющимся рыночным условиям.

Сфера управления цепями поставок широко исследована [17–35]. Некоторые из этих работ заслуживают особого внимания. Так, в работе [22] авторы рассмотрели координацию и совместное использование запасов в цепи поставок, в которой розничные продавцы имели независимое право определения заказов и совместное распределение запасов. В работе [31] приведена модель цепи поставок с децентрализованной структурой, включающая в себя производителя-монополиста и несколько зависимых розничных продавцов, причем особое внимание уделено политике ценообразования перевалки. Коллектив авторов в работе [32] представил модель цепи поставок с одним производителем и двумя розничными продавцами, проанализировав вопросы ценовой конкуренции и сотрудничества. Авторы работы [33] исследовали интеграцию поставщиков и конкуренцию между розничными продавцами, когда поставщику предоставляется выбор сотрудничества с розничными продавцами. Они провели сравнение стратегий пополнения запасов и ценовой политики в моделях цепей поставок с одним производителем и несколькими розничными продавцами, учитывая и централизованные и децентрализованные структуры [34].

Управление цепями поставок в рамках товарно-сырьевых бирж представляет собой актуальную исследовательскую тему, которая, при этом недостаточно исследована с точки зрения управления рисками и факторами неопределенности, особенно на примере товарно-сырьевых бирж. В большинстве случаев сырьевые сделки осуществляются напрямую между производителями и покупателями в формате *B2B*, что не обеспечивает прозрачность и эффективное управления рисками. В некоторых отраслях, в том числе в лесопромышленном комплексе, наблюдается практика уклонения от уплаты налогов и установления связей между участниками сделок, что может привести к утрате потенциальных клиентов и негативно воздействовать на ценообразование и налоговые поступления в бюджет. Введение инструментов товарно-сырьевых бирж в процесс сделок способствует повышению прозрачности и доступности для потенциальных клиентов, включая иностранные компании, что, в свою очередь, способствует снижению цен на сырье и увеличению его эффективной реализации.

В области управления цепями поставок в лесопромышленном комплексе проведено не-

достаточно исследований, особенно с учетом факторов неопределенности и рисков. Научные исследования в данной области ограничены, и это большая проблема, поскольку отрасль отличается сложностью и уникальными особенностями.

Модели управления цепями поставок учитывают особенности отрасли, однако практически не предусматривают оценку прибыли в условиях неопределенности. Данная проблема имеет важное значение для повышения эффективности стратегий управления, с помощью информационных технологий и менеджмента. Кроме того, особенность лесопромышленной отрасли заключается в значительной утрате объема древесины при ее транспортировке от производителя до покупателя, что необходимо учитывать при разработке стратегий управления цепями поставок и производственных планов.

Цель работы

Цель работы — разработка математической модели по определению оптимальных объемов производства товаров по технологии раскря, поступающего на склад сырья на основе формируемых цепочек поставок с товарно-сырьевой биржи, которая бы учитывала условия неопределенности в предложении и логистике в целях оценки максимальной прибыли на протяжении всего планировочного периода.

Материалы и методы

Рассмотрим два ключевых этапа производственного процесса: закупка сырья на бирже и его последующая переработка, а также управление производственными объемами на основе имеющихся запасов сырья.

Важно учитывать источники поступления сырья на биржу. Биржа заключает договоры с арендаторами, представляющими различные регионы, дает им возможность осуществлять торговые операции на ее площадке. После успешного завершения сделки между предприятием (заказчиком) и продавцом (арендатором, специализирующимся на добыче сырья), согласно условиям контракта, определенное количество сырья отправляется заказчику [23, 25]. Как правило, предприятия получают заказы от своих клиентов заблаговременно, что позволяет им строить долгосрочные планы.

Однако спрос на продукцию в лесопромышленной отрасли подвержен сезонным колебаниям, что вносит компаниям дополнительные вызовы в процесс планирования [23, 25].

Математическая модель. Производство в лесопромышленной сфере или в другой области невозможно без надлежащего запаса сырья. В данном исследовании мы воспользовались данными, предоставляемыми Санкт-Петербургом-

ской международной товарно-сырьевой биржей (далее — Биржа), которые есть в открытом доступе (АО «СПбМТСБ») (<https://spimex.com/markets/wood/trades/results/>). Ежедневно Биржа публикует информацию о сделках, ценах и объемах проданного сырья. Наряду с этим, Биржа предлагает услуги по доставке сырья до конечного потребителя. Предоставляется также возможность выбора того или иного региона, откуда можно получить необходимое сырье. В соответствии с правилами Биржи приобретение сырья возможно только в полном объеме предлагаемого лота. Производственный процесс состоит из следующих этапов: сырье доставляется на склад, затем перерабатывается в труху и прессуется в плиты OSB. Каждый вид сырья требует собственных плит OSB. Транспортировка осуществляется по Транссибирской железнодорожной магистрали, и все расходы на доставку лота включаются отправителем в стоимость конечной продукции.

Введем следующие обозначения параметров и переменных.

Параметры:

N — количество рассматриваемых длин бревен;

R — количество регионов — источников сырья на Бирже;

\bar{d} — максимальное рассматриваемое значение диаметра бревна для раскря;

\underline{d} — минимальное рассматриваемое значение диаметра бревна для раскря;

c_{irm} — цена лота i из региона r , появившаяся на бирже в день m ;

$p_{km}^{(1)}$ — цена реализации на товар типа k в день m ;

N_m^* — множество бревен, доступных в день m ;

$I(m, r)$ — количество лотов в день m в регионе r ;

Len_n — длина бревна n ;

len_n — требуемая длина № n для раскря бревна;

len_a — требуемая длина № a бруса;

$p_{n(m)}^{(2)}(Len_n)$ — функция цены на реализацию бревна длиной Len_n в день m на внутреннем рынке, где находится предприятие, причем

$$n^- \subset N_m^* : \begin{cases} \min(\{len_n\}_n) > Len_n, \\ \underline{d} > D_n, \\ D_n^* > \bar{d} \end{cases}, \forall n^* \in n^-, \quad (1)$$

где $n^*(m) \in \{N_{irm}^*\}_{i,r}$, $i = 0 : I(m, r)$, $r = 1 : R$;

$$Lot_{irm} = \{N_{irm}, D_n, Len_n, c_{imr}\}, n = 1 : N_{irm}; \quad (2)$$

$$N_m^* = n^-(m) \cup n^+(m); \quad (3)$$

$$n^+(m) = \{N_{nirm}^+, Len_n^+\}, n = 1 : N; \quad (4)$$

$$Len_n^+ = \left\{ \cup \min_{Len_n - len_{n>0}} \left(\{Len_{n_1} - len_n\}_{n_1} \right) \mid n_1 \in N_m^* \right\}; \quad (5)$$

$$n^-(m) = \{N_{nirm}^-, Len_n^-\}, n = 1 : N; \quad (6)$$

где $i = 0 : I(m, r)$, $r = 1 : R$.

Поясним некоторые обозначения: Lot_{irm} — лот с номером i из региона r появившийся на бирже в день m ; N_{irm} — количество бревен в лоте с номером i из региона r появившийся на бирже в день m ; D_n — диаметр бревна n ; c_{imr} — цена лота с номером i из региона r появившийся на бирже в день m ; $n^+(m)$ и $n^-(m)$ — множества бревен подходящих и неподходящих по длине и диаметру для производства в день m соответственно; N_m^+ и N_m^- — количество подходящих и неподходящих бревен длиной Len_n для раскря в день m в заявке i из региона r соответственно; Len_n^+ и Len_n^- — множество бревен, подходящих и не подходящих по длине Len_n для раскря соответственно.

Замечание 1:

$$\Sigma_n (N_{nirm}^- + N_{nirm}^+) = N_{irm}.$$

Замечание 2:

$$\Sigma_{n,i,r} (N_{nirm}^- + N_{nirm}^+) = |N_m^*|.$$

$A_{aen}^{(1)}(len_n, len_a)$ — карта раскря бревна типа n (длиной len_n) на брусья длиной len_a (e — номер варианта раскря);

$A_{aj}^{(2)}$ — норма выкройки заготовок типа j при раскря бруса длиной Len_a ;

$A_{jk}^{(3)}$ — норма потребления заготовок типа j для производства единицы товара типа k ;

B_0 — начальный бюджет;

FC — постоянные издержки;

M — горизонт планирования;

T_{rm} — время, за которое выкупленный в день m лот дойдет до склада;

L_r — расстояние от склада до региона r ;

S_m — расстояние, пройденное заявкой в день m ;

$left$ и $right$ — соответственно 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) в день m соответственно;

\bar{b} — вместимость склада.

Переменные:

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

λ_{irm} — решение о покупке лота i из региона r , появившейся на бирже в день m ;

b_{jm} — запас заготовок типа j в день m ;

y_{enm} — количество раскroенных бревен длиной в Len_n типом раскroя e в день m ;

z_{ajm} — количество раскраиваемых брусков длиной Len_a методом j в день m .

Обозначим решаемую задачу для каждого набора параметров e (список параметров указан выше) как $F^{(2,1)}(e)$, которая принимает вид (под e понимаем номер сгенерированных данных, на которых предстоит найти решения для каждой отдельной задачи)

$$-\sum \left(c_{irm} - \sum_{(n^* \in n^-)} p_{n^*m}^{(2)} (Len_{n^*}^-) N_{nirm}^- \right) \lambda_{irm} \rightarrow \max; \quad (7)$$

$$\sum_{e,n} A_{aen}^{(1)} y_{enm} = \sum_j z_{ajm}; \quad (8)$$

$$\sum_e y_{enm} = \sum_{i,r} N_{nirm}^+ \lambda_{irm}, \quad (9)$$

где $\tilde{m} = m - T_{r\tilde{m}}$;

$$b_{jm} = b_{j(m-1)} - \sum_k A_{jk}^{(3)} x_{km} + \sum_a A_{aj}^{(2)} (len_a) z_{ajm}; \quad (10)$$

$$B_0 + \sum_{\tilde{m}=1}^{m^*} \left(\sum_k p_{k\tilde{m}}^{(1)} x_{k\tilde{m}} - \sum_{i,r} \tilde{c}_{i\tilde{m}} \lambda_{i\tilde{m}} \right) - FC \cdot m^* \geq 0, \quad (11)$$

где $m^* = 1:M$; $\tilde{c}_{i\tilde{m}} = c_{irm} - \sum_{(n^* \in n^-)} p_{n^*m}^{(2)} (Len_{n^*}^-) N_{nirm}^-$.

$$\sum_j b_{jm} \leq \bar{b}; \quad (12)$$

$$T_{r\tilde{m}} = m^* : \begin{cases} \left| L_r - \sum_{\tilde{m}=\tilde{m}}^{m^*} S_{\tilde{m}} \right| \rightarrow \min \\ L_r - \sum_{\tilde{m}=\tilde{m}}^{m^*} S_{\tilde{m}} \leq 0 \end{cases}; \quad (13)$$

$$S_m \sim LN(a_m, \delta_m); \quad (14)$$

$$0 \leq x_{km} \leq H_{km}; \quad (15)$$

$$\lambda_{irm} = \{0; 1\}; \quad (16)$$

$$y_{enm}, z_{ajm} \in Z^+; \quad (17)$$

$$b_{jm} \geq 0, m = 1 : M; \quad (18)$$

$$b_{j0} = \text{const}. \quad (19)$$

Рассмотрим выражения (7)–(19) детальнее. Целевая функция (7) направлена на максимизацию значения прибыли:

$\sum p_{km}^{(1)} x_{km}$ — выручка от продажи произведенных товаров,

$\sum (c_{irm} - \sum_{(n^* \in n^-)} p_{n^*m}^{(2)} (Len_{n^*}^-) N_{nirm}^-) \lambda_{irm}$ — издержки.

Издержки состоят из разности суммы затрат на покупку сырья с товарно-сырьевой биржи $\sum c_{irm} \lambda_{irm}$ и суммы проданных бревен, длина которых не попадает под стандарт для дальнейшего раскroя (т. е. слишком короткие)

$$\sum (\sum_{(n^* \in n^-)} p_{n^*m}^{(2)} (Len_{n^*}^-) N_{nirm}^-) \lambda_{irm}.$$

Равенство (8) утверждает, что все раскroенные бруска в день m равны суммарному количеству выработанных заготовок разных типов в соответствии с нормой выработки $A_{aen}^{(1)}$. Равенство (9) утверждает, что все бревна, поступающие на склад через $T_{r\tilde{m}}$ дней, раскраиваются. Соотношение (10) отражает объем запаса заготовок на складе. Ограничение (11) призвано обеспечить предприятию соблюдение бюджетного правила. Ограничение (12) призвано обеспечить не превышение объема заготовок на складе относительно вместимости склада. Правила (13) и (14) отражают предположение, в соответствии с которым рассчитывается время товаров в пути. Неравенство (15) отражает максимальную производительность товаров. Выражения (15)–(19) отражают характер переменных.

Для тестирования модели взяты данные из источников, указанных в работе [25].

Результаты и обсуждение

Рассмотрим результаты тестирования модели (рис. 1–3). На рис. 1 отражена траектория прибыли для различных реализаций. Видно, что даже в оптимуме совсем непросто создать дополнительный финансовый прирост.

На рис. 2 указано, из каких регионов наиболее часто происходят поставки лотов. Здесь особенно интересны регионы 2, 4 и 5.

На рис. 3 отражены запасы заготовок на складе в каждый отдельный день. Исходя из данных, представленных на рис. 2 и 3, ясно, что больше всего производятся заготовки № 1 и 2, заготовок № 3, 4 и 5 меньше хранится на складе.

Рассмотрим положительные и отрицательные стороны полученной модели.

1. Отрицательные стороны

1.1. Менеджеры, ответственные за принятие решений, не владеют сведениями о реальном распределении во времени лотов со всеми их характеристиками, поэтому важно следующее:

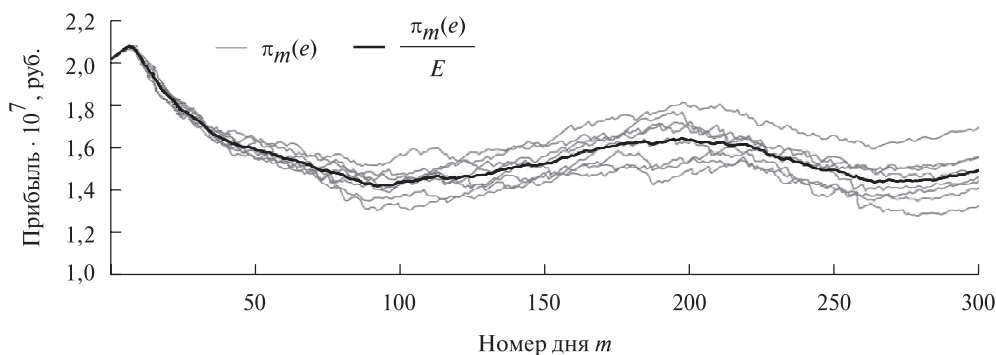


Рис. 1. Визуализация поведения прибыли для каждого сгенерированного набора данных e
Fig. 1. Visualisation of profit behaviour for each generated dataset e

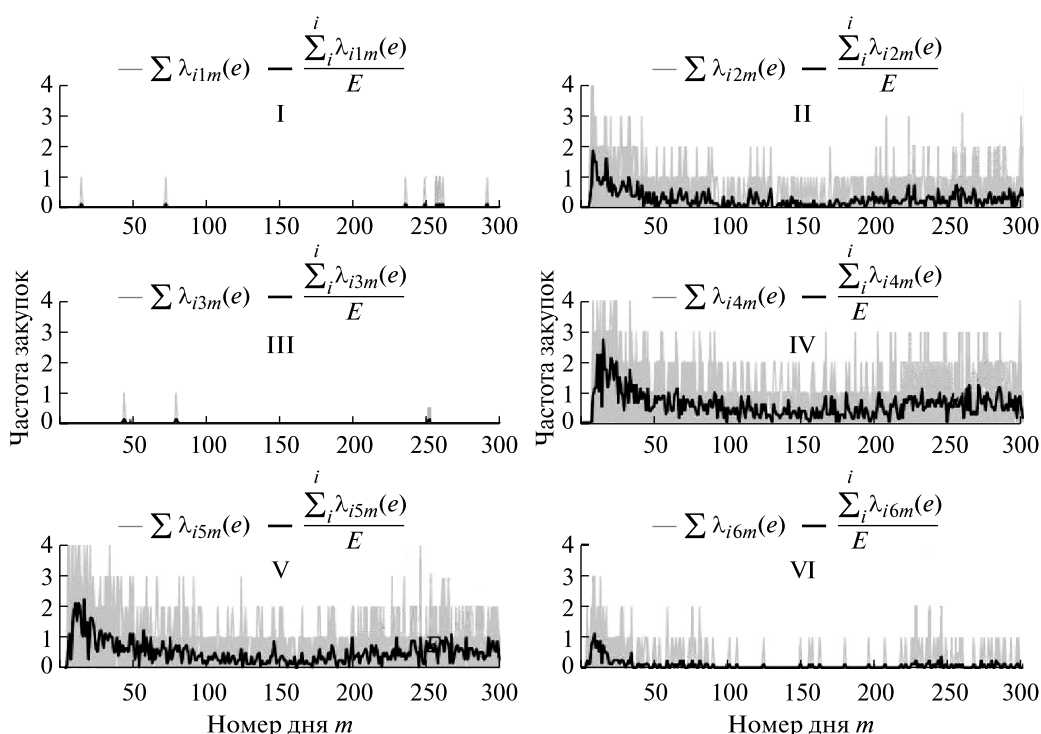


Рис. 2. Визуализация частоты закупок лотов с сырьем с товарно-сырьевой Биржи для каждого сгенерированного набора данных e (I–VI — регионы)
Fig. 2. Visualisation of the frequency of lot purchases with raw materials from the Commodity Exchange for each generated dataset e (I–VI — regions)

1.1.1. Собирать различные данные, связанные с поставленной задачей, за большой промежуток времени, однако на сайте Биржи доступны лишь данные с начала 2010-х годов, что крайне усложняет процесс формирования достаточного объема выборки данных для анализа. С течением времени эта проблема становится менее актуальной, поскольку растет объем отчетов по совершенным сделкам.

1.1.2. Строить сложные математические модели для максимально точного прогноза распределения заявок во времени.

1.2. Высокими темпами расширяются ограничения вследствие линейности модели [24].

1.3. Параметры a_m, δ_m следует знать для каждого дня, поскольку они могут изменяться с течением лет.

1.4. Знать об отсутствии четкого объяснения по поводу допустимости использования логнормального распределения значений, пройденного расстояния лотом.

1.5. Параметр β должен также изменяться во времени, так как летом показатель полезного объема сырья падает быстрее под воздействием температуры, влаги и механических воздействий насекомых [28].

1.6. В реальных условиях ограничение (15) должно включать в себя в качестве верхней оценки

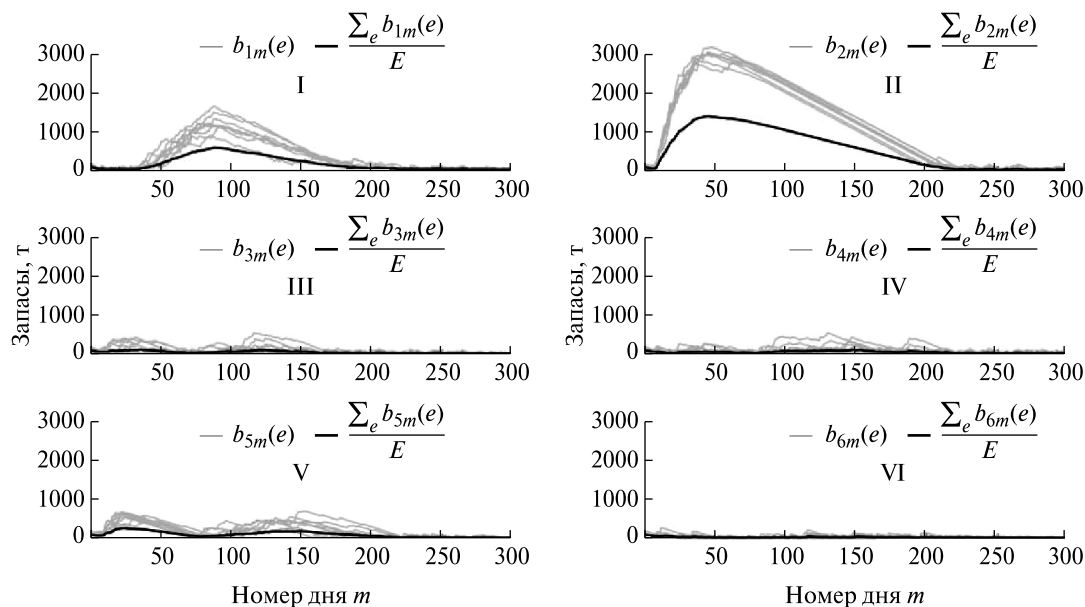


Рис. 3. Визуализация запасов заготовок на складе для каждого сгенерированного набора данных e (I–VI — заготовки)

Fig. 3. Visualisation of lumber stockpiling for each generated dataset e (I–VI — lumber stockpiling)

значение $\min(H_{km}, Q_{km})$, где Q_{km} — функция спроса на товары типа k в день m , что значительно позволит уточнить решение задачи.

1.7. Отсутствует выбор допустимости степени риска, что крайне важно для определения стратегии формирования сырьевого портфеля в современных условиях.

1.8. Предприятия лесопромышленной отрасли не всегда используют в качестве источника сырья Биржу, зачастую пользуются прямыми договорами B2B, которые нивелируют риски — этого нет в модели.

2. Положительные стороны

2.1. Эффективность данной модели с горизонтом планирования один год для верхней оценки прибыльности производства крупнейшей компании лесопромышленного сектора РФ «Сеgezha» (ПАО «Сеgezha Групп» Segezha Group PJSC. Официальный сайт: <https://segezha-group.com/about/>) с достаточно большими значениями объема сырья, лотов и широким участком регионов на Бирже, что наиболее часто встречается на предприятиях отрасли.

2.2. Концептуальная простота модели.

2.3. Возможность учета времени в пути лота путем введения логнормального закона распределения пройденного пути.

2.4. Учет наиболее часто применяющейся технологической концепции лесопромышленного производства — возможность раскря древесины на цельные составляющие.

2.5. Наличие известных методов оптимизации для задач линейного программирования [28].

Выводы

Разработанная модель определяет верхнюю границу прибыли предприятия лесопромышленной отрасли и учитывает время в пути лотов, а также учитывает наиболее распространенную и эффективную структуру производства лесопромышленной отрасли, где происходит раскря сырья. Модель позволяет формировать цепочки поставок сырья и объемы производства, используя бюджет предприятия и политику «just-in-time». Решение модели включает производство, состояние бюджета, цепочки поставок и уровень запасов заготовок. Модель полезна для топ-менеджмента предприятий лесопромышленной отрасли и дополняет экономико-математическую теорию принятия решений.

Список литературы

- [1] Tsay A.A., Agrawal N. Channel dynamics under price and service competition // *Manufacturing & Service Operations Management*, 2000, no. 2, pp. 372–391.
- [2] Tsay A.A., Agrawal N. Channel conflict and coordination in the e-commerce age // *Production and Operations Management*, 2004, no. 13, pp. 93–110.
- [3] Bernstein F., Federgruen A. A general equilibrium model for industries with price and service competition // *Operations Research*, 2004, no. 52, pp. 868–886.
- [4] Yao D.Q., Yue X., Liu J. Vertical cost information sharing in a supply chain with value-adding retailers // *Omega*, 2008, no. 36, pp. 838–851.
- [5] Xiao T., Yang D. Price and service competition of supply chains with risk-averse retailers under demand uncertainty // *International J. of Production Economics*, 2008, no. 114, pp. 187–200.

- [6] Wu D. Joint pricing-servicing decision and channel strategies in the supply chain // *Central European Journal of Operations Research*, 2011, no. 19, pp. 99–137.
- [7] Wu C.H. Price and service competition between new and remanufactured products in a two-echelon supply chain // *International J. of Production Economics*, 2012, no. 140, pp. 496–507.
- [8] Rezapour S., Farahani R.Z. Supply chain network design under oligopolistic price and service level competition with foresight // *Computers & Industrial Engineering*, 2014, no. 72, pp. 129–142.
- [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 // *J. of Retailing and Consumer Services*, 2018, no. 40 (2018), pp. 40–47.
- [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, no. 138, p. 106130.
- [11] Bernstein F., Federgruen A. Pricing and replenishment strategies in a distribution system with competing retailers // *Operations Research*, 2003, no. 51, pp. 409–426.
- [12] Chen K., Xiao T. Pricing and replenishment policies in a supply chain with competing retailers under different retail behaviors // *Computers & Industrial Engineering*, 2017, no. 103, pp. 145–157.
- [13] Bernstein F., Federgruen A. Decentralized supply chains with competing retailers under demand uncertainty // *Management Science*, 2005, no. 51, pp. 18–29.
- [14] Cachon G.P. Stock wars: inventory competition in a two-echelon supply chain with multiple retailers // *Operations Research*, 2001, v. 49, pp. 658–674.
- [15] Anderson E.J., Bao Y. Price competition with integrated and decentralized supply chains // *European J. of Operational Research*, 2010, v. 200, pp. 227–234.
- [16] David A., Adida E. Competition and coordination in a two-channel supply chain // *Production and Operations Management*, 2015, no. 24, pp. 1358–1370.
- [17] Adida E., DeMiguel V. Supply chain competition with multiple manufacturers and retailers // *Operations Research*, 2011, no. 59, pp. 156–172.
- [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, no. 65, pp. 98–110.
- [19] Shenoy P.P. Competitive inventory models // *RAIRO-Operations Research*, 1987, no. 21, pp. 1–19.
- [20] Yang S.L., Zhou Y.W. Two-echelon supply chain models: considering duopolistic retailers' different competitive behaviors // *International J. of Production Economics*, 2006, no. 103, pp. 104–116.
- [21] Zhang P., He Y., Shi C.V. Transshipment and coordination in a two-echelon supply chain // *RAIRO-Operations Research*, 2017, no. 51, pp. 729–747.
- [22] Yan X., Zhao H. Inventory sharing and coordination among n independent retailers // *European J. of Operational Research*, 2015, no. 243, pp. 576–587.
- [23] Роголин Р.С., Мазелис Л.С. Алгоритм и математическая модель формирования устойчивых цепочек поставок древесного сырья из регионов России: сравнение и анализ // *Вестник Пермского университета. Сер. «Экономика»*, 2020. Т. 15. № 3. С. 385–404. DOI: 10.17072/1994-9960-2020-3-385-404
- [24] Роголин Р.С. Моделирование перспектив взаимодействия предприятия лесопромышленного комплекса и товарно-сырьевой биржи России // *J. of Applied Economic Research*, 2020. Т. 19. № 4. С. 489–511. DOI: 10.15826/vestnik.2020.19.4.023
- [25] Роголин Р.С. Модель оптимизации плана закупок сырья из регионов России лесоперерабатывающим комплексом // *Бизнес-информатика*, 2020. Т. 14. № 4. С. 19–35. DOI: 10.17323/2587-814X.2020.4.19.35
- [26] Shukla S., Singh. P. Revolutionizing Supply Chain Management: Real-time Data Processing and Concurrency // *International J. of Innovative Science and Research Technology*, 2024, v. 9, pp. 23–30. DOI: <https://doi.org/10.38124/ijisrt/IJISRT24MAY207>
- [27] Gandomi A., Haider M. Beyond the hype: big data concepts, methods, and analytics // *International J. of Information Management*, 2015, v. 10, pp. 137–144. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2014.10.007>
- [28] 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 J. of Enterprise Technologies*, 2021, no. 5 (3 (113)), pp. 6–18. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.242960
- [29] Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.
- [30] Канторович Л.В. Математические методы организации и планирования производства. Л.: Изд-во ЛГУ, 1939. 68 с.
- [31] Shao J., Krishnan H., McCormick S.T. Incentives for transshipment in a supply chain with decentralized retailers // *Manufacturing & Service Operations Management*, 2011, no. 13, pp. 361–372.
- [32] Huang H., Ke H., Wang L. Equilibrium analysis of pricing competition and cooperation in supply chain with one common manufacturer and duopoly retailers // *International J. of Production Economics*, 2016, no. 178, pp. 12–21.
- [33] Glock C.H., Kim T. The effect of forward integration on a single-vendor–multi-retailer supply chain under retailer competition // *International J. of Production Economics*, 2015, no. 164, pp. 179–192.
- [34] Chen K., Xiao T. Pricing and replenishment policies in a supply chain with competing retailers under different retail behaviors // *Computers & Industrial Engineering*, 2017, v. 103, pp. 145–157.
- [35] Karimi M., Khademi-Zare H., Zare-Mehrjerdi Y., Fakhrzad 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, v. 56, pp. 1051–1078. DOI: 10.1051/ro/2022039

Сведения об авторе

Роголин Родион Сергеевич — канд. экон. наук, доцент кафедры «Математика и моделирование», ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет», rafassiaofusa@mail.ru

Поступила в редакцию 31.01.2024.

Одобрено после рецензирования 23.10.2024.

Принята к публикации 05.11.2024.

MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMAL FORMATION OF RAW MATERIAL SUPPLY CHAINS AND PRODUCTION VOLUMES WITH CUTTING TECHNOLOGY AT WOOD ENTERPRISES

R.S. Rogulin

Vladivostok State University, 41, Gogol st., 690014, Vladivostok, Russia

rafassiao@mail.ru

Important aspects related to the issues of forming supply chains and production volumes at wood enterprises with the most common production technology of cutting of incoming raw materials are considered. The main emphasis is placed on the issue of assessing the optimality of the decisions made. The study focuses on timber processing enterprises without their own sources of raw materials, which try to find an optimal solution at the end of the planning horizon on the basis of data on realized transactions at the commodity exchange. A mathematical model has been developed that takes into account the technology of cutting incoming raw materials, the time of lots in transit and uncertainty factors. Testing of the model on the data of the exchange and the enterprise in Primorsky Krai allowed to determine the optimal trajectory of profit, production volume and other important indicators. The issues of supply chain and production volume planning are considered. Regions - sources of raw materials are analyzed. Advantages and disadvantages of the presented mathematical model are given. It is shown that the developed model can serve as a basis for rational raw material transactions and be of interest to the top management of timber enterprises seeking to improve the efficiency of their activities.

Keywords: supply chain formation, production volumes, wood enterprises, mathematical model, share of useful raw material volume, lead time of lots in transit

Suggested citation: Rogulin R.S. *Matematicheskaya model' optimal'nogo formirovaniya tsepohek postavok syr'ya i ob'emov proizvodstva s tekhnologiyey raskroya na lesopromyshlennykh predpriyatiyakh* [Mathematical model of optimal formation of raw material supply chains and production volumes with cutting technology at wood enterprises]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 6, pp. 139–148.
DOI: 10.18698/2542-1468-2024-6-139-148

References

- [1] Tsay A.A., Agrawal N. Channel dynamics under price and service competition. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2000, no. 2, pp. 372–391.
- [2] Tsay A.A., Agrawal N. Channel conflict and coordination in the e-commerce age. *Production and Operations Management*, 2004, no. 13, 93–110.
- [3] Bernstein F., Federgruen A. A general equilibrium model for industries with price and service competition. *Operations Research*, 2004, no. 52, pp. 868–886.
- [4] Yao D.Q., Yue X., Liu J. Vertical cost information sharing in a supply chain with value-adding retailers. *Omega*, 2008, no. 36, pp. 838–851.
- [5] Xiao T., Yang D. Price and service competition of supply chains with risk-averse retailers under demand uncertainty. *International J. of Production Economics*, 2008, no. 114, pp. 187–200.
- [6] Wu D. Joint pricing-servicing decision and channel strategies in the supply chain. *Central European Journal of Operations Research*, 2011, no. 19, pp. 99–137.
- [7] Wu C.H. Price and service competition between new and remanufactured products in a two-echelon supply chain. *International J. of Production Economics*, 2012, no. 140, pp. 496–507.
- [8] Rezapour S., Farahani R.Z. Supply chain network design under oligopolistic price and service level competition with foresight. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, no. 72, pp. 129–142.
- [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. *J. of Retailing and Consumer Services*, 2018, no. 40 (2018), pp. 40–47.
- [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, no. 138, p. 106130.
- [11] Bernstein F., Federgruen A. Pricing and replenishment strategies in a distribution system with competing retailers. *Operations Research*, 2003, no. 51, pp. 409–426.
- [12] Chen K., Xiao T. Pricing and replenishment policies in a supply chain with competing retailers under different retail behaviors. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, no. 103, pp. 145–157.
- [13] Bernstein F., Federgruen A. Decentralized supply chains with competing retailers under demand uncertainty. *Management Science*, 2005, no. 51, pp. 18–29.
- [14] Cachon G.P. Stock wars: inventory competition in a two-echelon supply chain with multiple retailers. *Operations Research*, 2001, v. 49, pp. 658–674.
- [15] Anderson E.J., Bao Y. Price competition with integrated and decentralized supply chains. *European J. of Operational Research*, 2010, v. 200, pp. 227–234.
- [16] David A., Adida E. Competition and coordination in a two-channel supply chain. *Production and Operations Management*, 2015, no. 24, pp. 1358–1370.
- [17] Adida E., DeMiguel V. Supply chain competition with multiple manufacturers and retailers. *Operations Research*, 2011, no. 59, pp. 156–172.

- [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, no. 65, pp. 98–110.
- [19] Shenoy P.P. Competitive inventory models. *RAIRO-Operations Research*, 1987, no. 21, pp. 1–19.
- [20] Yang S.L., Zhou Y.W. Two-echelon supply chain models: considering duopolistic retailers' different competitive behaviors. *International J. of Production Economics*, 2006, no. 103, pp. 104–116.
- [21] Zhang P., He Y., Shi C.V. Transshipment and coordination in a two-echelon supply chain. *RAIRO-Operations Research*, 2017, no. 51, pp. 729–747.
- [22] Yan X., Zhao H. Inventory sharing and coordination among n independent retailers. *European J. of Operational Research*, 2015, no. 243, pp. 576–587.
- [23] Роголин 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] Роголин П.С. Моделирование перспектив взаимодействия предприятия лесопромышленного комплекса и товарно-сырьевой биржи России // *J. of Applied Economic Research*, 2020. Т. 19. № 4. С. 489–511. DOI: 10.15826/vestnik.2020.19.4.023
- [25] Роголин 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] Shukla S., Singh. P. Revolutionizing Supply Chain Management: Real-time Data Processing and Concurrency. *International J. of Innovative Science and Research Technology*, 2024, v. 9, pp. 23–30. DOI: <https://doi.org/10.38124/ijisrt/IJISRT24MAY207>
- [27] Gandomi A., Haider M. Beyond the hype: big data concepts, methods, and analytics. *International J. of Information Management*, 2015, v. 10, pp. 137–144. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2014.10.007>
- [28] 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 J. of Enterprise Technologies*, 2021, no. 5 (3 (113)), pp. 6–18. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.242960
- [29] Tarasov V.B. *Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nym organizatsiyam: filosofiya, psikhologiya, informatika* [From multi-agent systems to intelligent organizations: philosophy, psychology, informatics]. Moscow: Editorial URSS, 2002, 352 p.
- [30] Kantorovich L.V. *Matematicheskie metody organizatsii i planirovaniya proizvodstva* [Mathematical methods of organizing and planning production]. Leningrad: Leningrad State University, 1939, 68 p.
- [31] Shao J., Krishnan H., McCormick S.T. Incentives for transshipment in a supply chain with decentralized retailers. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2011, no. 13, pp. 361–372.
- [32] Huang H., Ke H., Wang L. Equilibrium analysis of pricing competition and cooperation in supply chain with one common manufacturer and duopoly retailers. *International J. of Production Economics*, 2016, no. 178, pp. 12–21.
- [33] Glock C.H., Kim T. The effect of forward integration on a single-vendor–multi-retailer supply chain under retailer competition. *International J. of Production Economics*, 2015, no. 164, pp. 179–192.
- [34] Chen K., Xiao T. Pricing and replenishment policies in a supply chain with competing retailers under different retail behaviors. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, v. 103, pp. 145–157.
- [35] Karimi M., Khademi-Zare H., Zare-Mehrjerdi Y., Fakhrzad 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, v. 56, pp. 1051–1078. DOI: 10.1051/ro/2022039

Author's information

Rogulin Rodion Sergeevich — Cand. Sci. (Economic), Associate Professor of the Vladivostok State University, rafassiaofusa@mail.ru

Received 31.01.2024.

Approved after review 23.10.2024.

Accepted for publication 05.11.2024.