

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ФОРМИРОВАНИЯ ЦЕПОЧЕК ПОСТАВОК СЫРЬЯ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ТОВАРНО-СЫРЬЕВОЙ БИРЖИ С ДЕТЕРМИНИРОВАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Р.С. Рогулин

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

rafassiaofusa@mail.ru

Рассмотрены значимые аспекты формирования цепочек поставок и объемов производства на предприятиях лесоперерабатывающей отрасли и проблема оценки оптимальности принимаемых решений. Приведен анализ лесопромышленных предприятий, не имеющих собственных источников сырья и ищущих оптимальное решение по его поставкам на основе информации о совершенных сделках на товарно-сырьевой бирже. Разработана математическая модель цепи поставок с учетом доли полезного объема сырья, продолжительности транспортировки и неопределенности. Выполнена проверка эффективности модели по данным биржи и предприятий Приморского края. Определен оптимальный вариант цепи поставок для получения предполагаемой прибыли, расширения объема производства и достижения других важных показателей. Приведены особенности планирования цепочек поставок и объемов производства. Проведен анализ регионов — источников сырья, преимуществ и недостатков математической модели. Результаты исследования можно использовать для совершения рациональных сделок на товарно-сырьевой бирже России и рекомендовать для топ-менеджмента лесопромышленных предприятий, которые стремятся повысить эффективность своей деятельности.

Ключевые слова: цепи поставок, расчет производства товаров, лесоперерабатывающие предприятия, товарно-сырьевая биржа, доля полезного объема сырья, время лотов в пути

Ссылка для цитирования: Рогулин Р.С. Решение задачи формирования цепочек поставок сырья лесопромышленных предприятий с товарно-сырьевой биржи с детерминированными параметрами // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 2. С. 166–174. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-166-174

В условиях современной глобальной экономики и быстро изменяющейся бизнес-среды эффективное формирование цепочек поставок сырья становится стратегически важным для лесопромышленных предприятий. Сырьевая база представляет собой неотъемлемую составляющую производственного процесса, а эффективное управление цепочками поставок сырья прямо влияет на конкурентоспособность и прибыльность предприятий.

Формирование оптимальных цепочек поставок (англ. — supply chain, SC) сырья сталкивается со сложностями особенно в условиях неопределенности. Факторы изменения спроса колебания объемов и качества сырья, транспортные ограничения и географические особенности способствуют развитию условий неопределенности и возможности риска при принятии решений. В такой ситуации актуальность приобретает разработка математической модели нахождения оптимальных решений для формирования цепочек поставок сырья с учетом всех сопутствующих факторов.

Актуальность данного исследования обусловлена не только стремительными изменениями в бизнес-среде, но и существующей необходимостью

снижения издержек, повышения эффективности производства, оптимизации использования ресурсов и улучшения общей конкурентоспособности предприятий. Такая математическая модель может стать необходимым инструментом при принятии решений в сфере формирования цепочек поставок сырья.

Исследования в области управления цепочками поставок сырья в условиях неопределенности часто ограничены эвристическими подходами и применением эмпирических методов, что ограничивает точность получаемых результатов и их применимость. Математическая модель, основанная на оптимизационных методах, послужит важным инструментом в достижении эффективности формирования цепочек поставок сырья лесопромышленных предприятий.

Обзор литературных источников. В сфере управления цепочками поставок сырья проведено обширное количество исследований. Авторы работы [1] предложили следующую цепочку поставок: один поставщик и два конкурирующих розничных продавца, уделив особое внимание соревнованию продавцов в области услуг и ценообразования и указав на то, что в определенных сценариях конкурирующие розничные продавцы выступают за усиление конкуренции.

В другом исследовании [2] проанализировано взаимодействие между сотрудничеством поставщиков и соревнованием между ними в цепочке поставке сырья, включая розничный и прямой каналы.

Авторы работы [3] разработали общую структуру стохастического равновесия запасов, в которой ключевые факторы — обслуживание и ценовое соревнование поставщиков.

В работе [4] основной акцент сделан на воздействие при обмене информацией об оптимальных стратегиях розничного продавца, предоставляющего услуги с добавленной стоимостью.

Другие исследователи [5] провели сравнительный анализ влияния чувствительности к рискам розничных продавцов на стратегии участников цепочки в двух различных цепочках поставок сырья. Их исследование представило структуру конкурентных цен и обслуживания исходя из неопределенности спроса и показало, что розничные продавцы с более высокой чувствительностью к риску имеют менее высокие оптимальные уровни обслуживания и розничные цены.

В работе [6] охарактеризованы общие стратегии обслуживания и ценообразования в разных каналах, в которых продавцы и розничные торговцы могли настраивать уровни обслуживания последовательно или одновременно. В исследовании [7] изложена двухуровневая модель цепочки поставок сырья по влиянию на обслуживание утвержденных производителей и тех, кто вводит новые продукты. Эти выводы показали, что ценовая и сервисная конкуренция влияют на издержки переработки и инвестиции в услуги, особенно для производителей новых продуктов.

В работе [8] представлена двухуровневая конкурентная модель цепочки поставок сырья с учетом конкуренции цен и обслуживания розничных продавцов. В исследовании [9] проанализирована модель цепочки поставок сырья, зависящая от колебания спроса, когда несколько конкурирующих розничных продавцов применяют различные стратегии ценообразования и обслуживания. Группа ученых [10] изучала двухканальную модель цепочки поставок сырья, также подверженную колебаниям спроса, с упором на сотрудничество розничных продавцов и соревнование в обслуживании и ценообразовании. В их исследовании использовались подходы из теории игр для достижения равновесия Штакельберга — Нэша, так как два конкурирующих розничных продавца и поставщик предоставляли продукт через прямой онлайн-канал.

В работе [11] рассмотрено распространение одного продукта одним производителем среди нескольких розничных продавцов в рамках цепочки поставок сырья с акцентом на пополне-

ние запасов и ценовую политику, основанную на соревновании моделей Бертрана и Курно. В дополнение к этому авторы расширили свои исследования, включив отношение ритейлеров к соревнованию и сотрудничеству [12]. Авторы статьи [13] разработали модель цепочки поставок сырья с неопределенностью спроса и децентрализованной структурой: один поставщик и несколько конкурирующих розничных продавцов. Они также предложили модель контрактов, позволяющую цепочке поставок иметь централизованную структуру.

Автор исследования [14] представил приближенное решение проблемы управления запасами в двухуровневой модели цепочки поставок: один производитель и несколько розничных продавцов, согласно которой розничные продавцы могли как конкурировать, так и сотрудничать. Коллектив ученых в работе [15] проанализировал децентрализованные и централизованные модели цепочки поставок, сфокусировав внимание на ценовом соревновании. Они представили следующую модель цепочки поставок: один поставщик и несколько дифференцированных розничных продавцов, согласно которой поставщики стремятся максимизировать количество розничных продавцов [16].

Множество исследований сосредоточено на вопросах управления запасами [17–36]. Например, авторы статьи [22] подошли к анализу координации и совместного использования запасов между розничными продавцами в цепочке поставок сырья с учетом независимых заказов и распределения запасов. В другом исследовании [32] была создана модель цепочки поставок сырья с децентрализованной структурой, включая производителя-монополиста и несколько розничных продавцов, и акцентом на ценовую политику. Группа ученых в статье [33] представила иную модель цепочки поставок сырья: один производитель и два розничных продавца, исходя из ценовой конкуренции и сотрудничества. В другом исследовании [34] был рассмотрен подход к прямой интеграции поставщиков и конкуренции между розничными продавцами с предоставлением поставщику возможности выбора сотрудничества с одним из розничных продавцов. Они провели анализ политики пополнения и ценообразования по моделям цепочки поставок сырья с централизованными и децентрализованными структурами [35].

Управление цепочками поставок сырья в рамках товарно-сырьевых бирж является одной из актуальных и всесторонне исследованных тем, представленных в научной литературе, однако оно характеризуется уникальными особенностями. В частности, недостаточное внимание уделяется

управлению цепочками поставок сырья в условиях неопределенности и рисков, особенно на товарно-сырьевых биржах. Обычно сырьевые сделки проходят напрямую между продавцами и покупателями в формате «бизнес для бизнеса» (business-to-business — B2B). Однако в лесной индустрии, особенно в РФ, многие компании продолжают работать за пределами официальных структур, избегая уплаты налогов. В результате на установление контактов между продавцами и покупателями может быть потрачено значительное время, что ограничивает доступ к клиентам и влияет на цены на сырье, а также ущемляет доходы национального бюджета, который упускает часть налоговых поступлений. Применение инструментов товарно-сырьевых бирж может повысить прозрачность сделок и расширить круг потенциальных клиентов продавцов, включая иностранные компании, нуждающиеся в сырье, без необходимости прямого контакта. Это может снизить цены на сырье и сделать его реализацию более эффективной.

В литературе по управлению цепочками поставок сырья часто рассматриваются вопросы, связанные с формированием и организацией эффективных цепочек. Для этого разрабатываются математические модели, учитывающие специфику отрасли, изучаются проблемы менеджмента, связанные с организацией производства и формированием цепочек поставок. При таких исследованиях широко применяются такие методики, как «бережливая логистика» (англ. — lean logistics), «шесть сигм» (англ. — six sigma) и др. Однако вопросы оценки возможной прибыли в условиях неопределенности и с учетом особенностей лесной индустрии остаются мало изученными и в научной литературе их недостаточно. Например, сокращение объема древесины при транспортировке до клиента является специфической проблемой лесного сектора, требующей особого внимания при формировании цепочек поставок и планировании производства.

Задача исследования

Задача исследования — изучение деятельности компаний в сфере лесной промышленности с помощью рассмотрения двух важных этапов производственного процесса: 1) закупки сырья на товарно-сырьевой бирже; 2) производства товаров на основе имеющихся запасов сырья. При этом важно уделить внимание источникам поставок сырья на товарно-сырьевую биржу. Биржа заключает договоры с арендаторами лесных участков в разных регионах, предоставляя им площадку для проведения торгов. После совершения сделки между предприятием (заказчиком) и продавцом (арендатором участка) по дальнейшей обработке

сырья, соответствующий договору объем сырья отправляется заказчику [23, 25]. Обычно компании получают заказы от клиентов заранее, что позволяет осуществлять долгосрочное планирование деятельности предприятия. Кроме того, спрос на продукцию лесопромышленной отрасли характеризуется сезонными колебаниями, что усложняет планирование [23, 25].

Цель работы

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

Для достижения намеченного результата необходимо выполнить:

1) анализ научных литературных источников, посвященных указанной проблеме;

2) разработать экономико-математическую модель, предназначенную для построения цепочек поставок сырья и определения оптимального объема производства товаров в сфере лесопромышленной индустрии. Особое внимание следует уделить вопросам распределения заказов в период времени, длительности доставки товарных партий на склад предприятия, анализу полученных результатов на практике путем тестирования модели.

Математическая модель. Процесс производства невозможен без обеспечения его необходимыми объемами запасов сырья. Для исследования были использованы данные, предоставляемые Санкт-Петербургской международной товарно-сырьевой биржей (далее — биржа) доступные для общественного использования (<https://spimex.com/markets/wood/trades/results/>). Ежедневно на бирже публикуется информация о проведенных сделках, ценах и объемах реализованного сырья. Биржа также предоставляет дополнительные услуги по доставке сырья до конечных потребителей, и эти расходы включаются в общую стоимость продукции. Выбор поставщика сырья возможен из множества регионов, откуда поступает необходимое сырье. В соответствии с принятой биржей практикой возможность приобретения сырья предоставляется только для всего его объема, который представляет собой лот. Процесс производства подразумевает следующие шаги: сырье доставляется на склад, затем оно проходит процесс переработки, преобразуясь в труху, и далее сжимается в плиты ориентированной структуры (oriented strand board, ОСБ). Каждый вид сырья требует своего типа плит ОСБ. Для транспортировки используются железнодорожные марш-

руты, в частности транссибирская магистраль, причем расходы на доставку лота включаются в цену продукции и оплачиваются отправителем.

Введем следующие обозначения параметров и переменных.

Параметры:

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

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

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

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

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

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

\underline{b} — неприкосновенный уровень запаса сырья;

\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 значение 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 , появившегося 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 $F^{(1,1)}(e)$ и она примет вид:

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\underline{m} = 1 : M;$$

где $\tilde{m} = m - T_{r\tilde{m}}$;

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

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

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

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

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

Поясним, что в ограничениях (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 — $b_{l,m-1}$, а также поступившего объема сырья на склад 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) принимает только целые и неотрицательные значения. Факт принятия решения по вопросу покупки лота задается соотношением (4). Объем сырья на складе ограничен сверху значением максимальной вместимости склада (5) и снизу (6), так как не может быть отрицательным. Любое предприятие имеет свой бюджет, за пределы которого ему нельзя выходить (7). Время в пути каждой заявки рассчитывается исходя из соотношений (8), (9). В формуле (9) было введено допущение, что случайная величина расстояния, которое проходит лот в день m , имеет логнормальное распределение. Это связано с сезонностью на железной дороге, по которой идет транспортировка продукции до склада покупателя.

С данными можно детально ознакомиться в работах [25, 27, 29]. Коэффициент полезного объема сырья задан формулами (10), (11). Примем, что $\varepsilon^{(1)}$ имеет равномерное распределение, поскольку нет информации о том, как изменяется рабочий объем сырья со временем.

При этом объем производимых товаров (12) также подвержен физическим ограничениям сверху.

Как следует из описания модели $F^{(1.1)}(e)$, она является задачей нелинейного и стохастического программирования. Для решения поставленной задачи необходимо рассмотреть алгоритм решения, который примет следующий вид:

1) разыграть значения (8), (9) и γ_{im} с учетом выражения (11);

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

Калибровка. Тестирование модели было проведено, с одной стороны, на данных предприятия, расположенного в Приморском крае, с другой — сгенерированы авторами.

Рассмотрим, как сгенерированы данные, связанные с распределением лотов во времени. Для этого были взяты данные с товарно-сырьевой биржи за 120 дней, начиная с 01.02.2022. Каждые 30 дней выполняли расчет математического ожидания и дисперсии количества заявок, объемов сырья в каждой заявке и средней цены на 1 м³. Далее по нормальному закону с вычисленными характеристиками были сформированы E наборы данных. Остальные значения параметров логистики и производственных процессов (\bar{b} , \underline{b} , B_0 , FC , a_m , δ_m , β , L_r) были взяты с предприятия в соответствии с их оценками.

Для определенности используем $K = 4$ типов товаров, горизонт планирования длиной $M = 100$ дней, типы сырья $L = 2$, количество регионов $R = 4$, количество лотов каждый день в диапазоне $0 \leq I \leq 6$, количество различных наборов входных параметров $E = 400$. Биржа представлена четырьмя регионами: Иркутская область ($r = 1$), Пермский край ($r = 2$), Республика Бурятия ($r = 3$), Московская область ($r = 4$). Горизонт планирования лежит в интервале между 1 февраля 2022 г. и 15 мая 2022 г.

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

Для проведения вычислений были использованы высокоуровневый язык программирования MatLAB и встроенная функция intlinprog (MathWorks. Справочный центр. Intlinprog. Смешанно-целочисленное линейное программирование (MILP). <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html>) для поиска решения задач смешанно-целочисленной линейной оптимизации. Эта функция использует общий алгоритмический метод ветвей и границ.

Результаты и обсуждение

На рисунке изображен показатель прибыли в каждый отдельный день. Серым цветом обозначены

Т а б л и ц а 1

Основные входные параметры предприятия

Main input parameters of the enterprise

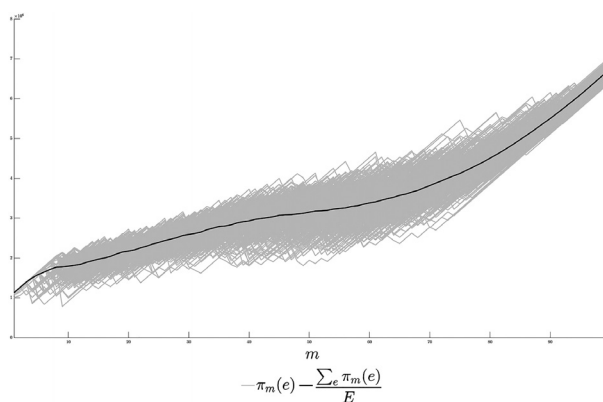
Параметр	Значение
$\forall m > 0: p_{km}, k = 1:K, \text{ руб.}$	$(1, 1,39, 1,51, 1,61) \cdot 10^4$
$\bar{b}, \text{ м}^3$	3000
$\underline{b}, \text{ м}^3$	40
$B_0, \text{ руб.}$	$3 \cdot 10^6$
left(m), у. е.	$\frac{100}{m \cdot 10^5}$
right(m), у. е.	$\frac{100}{m \cdot 10^5}$
$\forall m, k > 0: H_{km}$	4
$L_r, r = 1:R, \text{ км}$	(3740, 7560, 3250, 9030)

Т а б л и ц а 2

Затраты сырья на производство единицы товара по предприятию

Raw material costs for the production of a unit of goods by the enterprise

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



Визуализация значений прибыли: серым цветом — траектории прибыли при работе модели над каждым из ее наборов данных; черным — усредненное значение траекторий прибыли (скриншот)

Visualisation of profit values: grey — profit paths when the model works on each of its data sets; black — average value of profit paths (screenshot)

объемы прибыли для каждого отдельного набора данных, черным — среднее значение. Наиболее финансово сложный период приходится на 40...60 дни планирования — показатель прибыли при оптимальном решении почти стабилизируется и не изменяется, что позволяет утверждать о сложности рассматриваемого периода, с точки зрения управленческого подхода.

Рассмотрим положительные и отрицательные стороны полученной модели.

Отрицательные стороны

В реальных условиях планирования производства чрезвычайно сложно представить себе ситуацию, в которой менеджеры, принимающие решения, обладают всем объемом информации о фактическом распределении лотов во времени с учетом всех их характеристик. Поэтому важно иметь разнообразные данные, относящиеся к поставленным задачам, за продолжительный период времени. На веб-сайте биржи представлены данные лишь с начала 2010-х годов, что осложняет задачу сбора достаточно большой выборки данных для последующего анализа. Важно, что со временем эта проблема теряет актуальность, поскольку объем отчетов о совершенных сделках растет. По теории аукционов прогнозирование ситуаций на биржах представляет собой сложную задачу, поскольку влияние перемен на биржах усиливается с появлением частных инвесторов (в данной задаче — небольших предприятий), и эти перемены трудно поддаются точному прогнозированию. Исходя из этого актуальность приобретает разработка методов прогнозирования ситуаций на биржах не только для ценных бумаг, но и для сырьевых товаров. Возрастающее количество ограничений из-за линейной природы модели делает ее сложной для решения [24]. Не существует четкого объяснения целесообразности использования логнормального распределения для описания пройденного лотом расстояния.

Положительные стороны

Для оценки прибыльности производства по различным его масштабам, включая даже такую крупную компанию лесной отрасли, как, например, «Segezha Group» — одну из крупнейших компаний лесопромышленного сектора в России, данную модель можно применить при крупных объемах сырья, лотов и большом числе регионов на бирже. Эффективный горизонт планирования составляет один год. Это наиболее распространенный срок на предприятиях данной отрасли [23–26]. Преимущество модели заключается в ее концептуальной простоте. Модель способна учесть время, необходимое для перемещения лота от поставщика к покупателю. Важным аспектом является наличие коэффициента полезного объема сырья для производственных целей. Модель использует известные методы оптимизации для решения задач линейного программирования, что облегчает ее применение [29].

Выводы

Созданная модель предназначена для определения верхней границы прибыли компаний лесопромышленной отрасли и определяет время в пути лотов и их полезный объем. С ее помощью можно строить оптимальные цепочки поставок с

учетом сырьевых ресурсов и объемов производства, соблюдая бюджет предприятия. Решение, полученное с помощью модели, охватывает производственные процессы, денежные потоки, логистические маршруты и уровень запасов. Этим инструментом могут воспользоваться топ-менеджеры лесопромышленной отрасли.

Апробация разработанной модели на лесоперерабатывающем предприятии позволила выработать рекомендации по взаимодействию с товарно-сырьевой биржей. Согласно анализу, закупка сырья из Московской области и Пермского края может оказаться эффективной, несмотря на географическую близость других регионов. В то же время приобретение сырья из Иркутской области и Республики Бурятия рекомендуется рассматривать с учетом конкретных условий. Расчеты подтверждают, что совершение разумных сырьевых сделок на российской бирже вполне осуществимо.

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*, 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, 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, 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, article ID: 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, no. 49, pp. 658–674.
- [15] Anderson E.J., Bao Y. Price competition with integrated and decentralized supply chains // *European J. of Operational Research*, 2010, no. 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] 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. № 3 (15). С. 385–404.
- [24] Berglof E., Foray D., Landesmann M., Lin J. Y., Campos M. N., Sanfey P., Radosevic S., Volchkova N. Transition economics meets new structural economics // *J. of Economic Policy Reform*, 2015, v. 18, no. 3, pp. 191–220.
- [25] Di Meglio G., Gallego J., Maroto A., Savona M. Services in developing economies: A new chance for catching-up? // *SPRU Working Paper Series*, 2015, no. 2015–32, pp. 1–33.
- [26] Felipe J., Mehta A. Deindustrialization? A global perspective // *Economics Letters*, 2016, v. 149, pp. 148–151.
- [27] Gouvea R., Lima G. Balance of payments constrained growth in a multisectoral framework: A panel data investigation // *J. of Economic Studies*, 2013, v. 40, no. 2, pp. 240–254.
- [28] Romano L., Trau F. The nature of industrial development and the speed of structural change // *Structural Change and Economic Dynamics*, 2017, v. 42, pp. 26–37.
- [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 J. of Enterprise Technologies*, 2021, no. 5, pp. 6–18.
- [30] Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.
- [31] Канторович Л.В. Математические методы организации и планирования производства. Л.: Изд-во ЛГУ, 1939. 304 с.
- [32] 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.
- [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 J. of Production Economics*, 2016, no. 178, pp. 12–21.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [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, no. 56, pp. 1051 – 1078.

Сведения об авторе

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

Поступила в редакцию 16.05.2023.

Одобрено после рецензирования 21.08.2023.

Принята к публикации 04.12.2023.

SOLVING PROBLEM OF FORMING RAW MATERIAL SUPPLY CHAINS FOR WOOD ENTERPRISES FROM COMMODITY EXCHANGE WITH DETERMINISTIC PARAMETERS

R.S. Rogulin

Vladivostok state university, 41, Gogol st., 690014, Vladivostok, Russia

rafassiaofusa@mail.ru

Significant aspects related to the problems of forming supply chains and production volumes at forest processing enterprises are considered. The main attention is paid to the problem of assessing the optimality of decisions made. The study analyzes forestry enterprises that do not have their own sources of raw materials and seek to find the optimal solution based on information about transactions on the commodity exchange that have already been carried out. A mathematical model has been developed that takes into account the share of the useful volume of raw materials, the time spent on transportation, and uncertainties. To test the effectiveness of the model, data from the exchange and enterprises located in the Primorsky Territory were used. Thanks to this, it was possible to determine the optimal path for obtaining profit, production volume and other important indicators. The issues of planning supply chains and production volumes are discussed, the regions that source raw materials are analyzed, and the advantages and disadvantages of the proposed mathematical model are given. The results obtained can be used to carry out rational transactions on the Russian Commodity and Raw Materials Exchange and are of interest to top management of forestry enterprises that seek to improve the efficiency of their activities.

Keywords: supply chains, calculation of production of goods, timber processing enterprises, commodity exchange, share of the useful volume of raw materials, time of lots in transit

Suggested citation: Rogulin R.S. *Reshenie zadachi formirovaniya tsepochek postavok syr'ya lesopromyshlennykh predpriyatiy s tovarno-syr'evoy birzhi s determinirovannymi parametrami* [Solving problem of forming raw material supply chains for wood enterprises from commodity exchange with deterministic parameters]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 166–174. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-2-166-174

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, 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*, 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 J. 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, 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, article ID: 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, no. 49, pp. 658–674.
- [15] Anderson E.J., Bao Y. Price competition with integrated and decentralized supply chains. *European J. of Operational Research*, 2010, no. 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] Rogulin R.S., Mazelis L.S. *Algoritm i matematicheskaya model' formirovaniya ustoychivyykh tsepohek postavok drevsnogo syr'ya iz regionov Rossii: sravnenie i analiz* [Algorithm and mathematical model for the formation of sustainable supply chains of wood raw materials from Russian regions: comparison and analysis]. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya «Ekonomika»* [Bulletin of Perm University. Series «Economics»], 2020, no. 3 (15), pp. 385–404.
- [24] Berglof E., Foray D., Landesmann M., Lin J. Y., Campos M. N., Sanfey P., Radosevic S., Volchkova N. Transition economics meets new structural economics. *J. of Economic Policy Reform*, 2015, v. 18, no. 3, pp. 191–220.
- [25] Di Meglio G., Gallego J., Maroto A., Savona M. Services in developing economies: A new chance for catching-up?. *SPRU Working Paper Series*, 2015, no. 2015–32, pp. 1–33.
- [26] Felipe J., Mehta A. Deindustrialization? A global perspective. *Economics Letters*, 2016, v. 149, pp. 148–151.
- [27] Gouvea R., Lima G. Balance of payments constrained growth in a multisectoral framework: A panel data investigation. *J. of Economic Studies*, 2013, v. 40, no. 2, pp. 240–254.
- [28] Romano L., Trau F. The nature of industrial development and the speed of structural change. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2017, v. 42, pp. 26–37.
- [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 J. of Enterprise Technologies*, 2021, no. 5, pp. 6–18.
- [30] Tarasov V.B. *Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nykh organizatsiyam: filozofiya, psikhologiya, informatika* [From multi-agent systems to intelligent organizations: philosophy, psychology, computer science]. Moscow: Editorial URSS, 2002, 352 p.
- [31] Kantorovich L. V. *Matematicheskie metody organizatsii i planirovaniya proizvodstva* [Mathematical methods of organization and production planning]. Leningrad: Leningrad State University, 1939, 304 p.
- [32] 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.
- [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 J. of Production Economics*, 2016, no. 178, pp. 12–21.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [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, no. 56, pp. 1051 – 1078.

Author's information

Rogulin Rodion Sergeevich — Cand. Sci. (Economic), Associate Professor of the Department «Mathematics and Modeling», Vladivostok State University, rafassiaofusa@mail.ru

Received 16.05.2023.

Approved after review 21.08.2023.

Accepted for publication 04.12.2023.