

DOI: 10.17323/2587-814X.2024.4.98.111

# Управление ценовой политикой лесопромышленного предприятия с учетом проблем формирования цепей поставок сырья и расчета объемов производства\*

**Р.С. Рогулин**

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

Владивостокский государственный университет, Владивосток, Россия

## Аннотация

В работе рассмотрена математическая модель, позволяющая менеджерам лесопромышленного предприятия формировать цепи поставок и управлять ценовой политикой организации. Данная модель представляет собой модификацию модели, разработанной ранее, и отличается учетом технологии раскроя сырья. Модель принимает во внимание нормы потребления сырья, закупки на товарно-сырьевой бирже, транспортировку продукции и ценовую политику предприятия с учетом спроса. Целью модели является максимизация значения операционной прибыли предприятия. При поиске решения применяется стратегия оптимизации, включающая два этапа: применение линейной оптимизации на первом этапе и генетического алгоритма на втором. В результате апробации модели на одном из лесоперерабатывающих предприятий Приморского края получены данные, на основе которых сформулированы рекомендации для менеджеров компании относительно сотрудничества с лесозаготовителями. Данная работа представляет собой важный шаг в разработке методологии управления цепями поставок в лесопромышленной отрасли с учетом технологии раскроя сырья. Дальнейшие исследования могут включать модификацию модели с учетом вероятностных факторов, улучшение методов поиска решений и разработку более точных функций спроса на продукцию. Работа имеет практическую значимость для предприятий лесоперерабатывающей отрасли, поскольку может способствовать совершенствованию их производственных процессов и увеличению прибыли.

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

**Ключевые слова:** цепь поставок, объем производства, лесоперерабатывающее предприятие, оптимальность решений, математическая модель, товарно-сырьевая биржа, доля полезного объема сырья, время лотов в пути, рациональные сырьевые сделки, повышение эффективности

**Цитирование:** Рогулин Р.С. Формирование цепей поставок и управление ценовой политикой лесопромышленного предприятия // Бизнес-информатика. 2024. Т. 18. № 4. С. 98–111.

DOI: 10.17323/2587-814X.2024.4.98.111

## Введение

Лесопромышленные предприятия, играющие значительную роль в экономике, сталкиваются с постоянно растущими вызовами и сложностями, связанными с формированием эффективных цепей поставок сырья и организацией производства с использованием технологий раскроя. На лесопромышленных предприятиях вопросы оптимизации ценовой политики с учетом формирования цепей поставок и расчета объемов производства являются актуальными и критически важными [1–10].

Лесопромышленная отрасль имеет стратегическое значение, поставляя сырье и продукцию, необходимую для множества отраслей, начиная от строительства и заканчивая производством бумаги и мебели. Однако в условиях изменяющихся рыночных требований, экологических ограничений и интенсивной мировой конкуренции, лесопромышленные предприятия вынуждены постоянно приспосабливаться и оптимизировать свои производственные и логистические процессы [2, 11–15].

Важность данной темы подчеркивается ее актуальностью в современном мире. Резкий рост конкуренции и внешних факторов, таких как изменения климата и законодательства, оказывают давление на лесопромышленные предприятия, вынуждая их стремиться к повышению эффективности производства, снижению издержек и улучшению качества продукции [3].

Анализ существующих исследований [1–22] подтверждает сложность задачи оптимизации цепей поставок сырья и объемов выпуска продукции на лесопромышленных предприятиях. Эффективное управление этими процессами требует учета множества переменных, ограничений и факторов неопределенности, связанных с производственными и логистическими операциями.

Исходя из вышеизложенного, можно утверждать, что разработка математических моделей и методов оптимизации для формирования эффективных цепей поставок и объемов выработки готовых изделий с использованием технологий раскроя становится неотъемлемой частью стратегии развития лесопромышленных предприятий.

Исследование, представленное в данной статье, актуально в контексте постоянно меняющейся лесопромышленной отрасли и стремительно развивающихся технологий, способных повысить эффективность производства и снизить его негативное воздействие на окружающую среду. Эти решения могут помочь лесопромышленным предприятиям снизить затраты, оптимизировать производственные процессы и повысить качество продукции, а также обеспечить соответствие новым стандартам устойчивости и экологической безопасности.

Текущее исследование, с одной стороны, отличается от аналогов [1–20] тем, что позволяет учитывать технологию раскроя круглого леса, поступающего в производство, в совокупности с другими важными факторами лесопромышленного производства, к числу которых относятся формирование цепей поставок сырья с товарно-сырьевой биржи (поскольку у предприятия нет своих делян) и определение объемов производства и ценовой политики предприятия на всем горизонте планирования. С другой стороны, данная работа дополняет работу [21]: в ней представлен алгоритм оптимизации, позволяющий ускорить процесс поиска оптимального решения.

Структура работы предусматривает обоснование актуальности исследования, обзор научных источников, постановку целей и задач исследования, разработку математической модели и алгоритма оптимизации, описание результатов апробации модели на данных товарно-сырьевой биржи и одного из лесопромышленных предприятий Приморского края, формирование предложений в части последующей доработки и модификации модели.

## 1. Обзор литературы

Тема оптимизации формирования цепей поставок сырья и расчет объемов выпуска продукции с использованием технологии раскроя на лесопромышленных предприятиях представляет собой многогранное поле исследований, которое становится все более актуальным в современном мире, где работа в условиях меняющейся экономической и экологической среды, неизбежно столкновение с постоянными вызовами в области управления цепями поставок и оптимизации производственных процессов.

Основными целями исследований в этой области являются увеличение эффективности производства [1–3], снижение производственных и логистических издержек [4, 5], уменьшение объемов отходов [6, 7], а также улучшение качества продукции [8, 9] с учетом соотношения спроса и цен. За последние три года была опубликована лишь одна работа [13], которая бы совмещала в себе основные факторы производства лесопромышленного комплекса – взаимосвязь спроса и цен на готовую продукцию, производственный процесс, формирование цепей поставок сырья и построение маршрутов транспортировки готовой продукции до покупателей. Однако вторая производная функции спроса в этой модели в точке 0 не является непрерывной, что указывает на наличие мгновенной скорости изменения спроса при крайне маленьком изменении цены. Кроме того, реальное производство лесопромышленной отрасли чаще занимается не производством ОСБ-плит, а выкройкой из поступившего круглого леса ламелей и других заготовок для дальнейшего производства.

В последние десятилетия исследователи активно работают над разработкой математических моделей [10] и методов оптимизации [11] для решения сложных задач, связанных с управлением цепями поставок и производством на лесопромышленных предприятиях. Эти модели и методы позволяют учитывать множество переменных, ограничений и неопределенностей, что свойственно данной отрасли.

Одним из ключевых аспектов исследований является интеграция технологии раскроя в оптимизацию цепей поставок и объема производства [12]. Технология раскроя позволяет максимально эффективно использовать лесное сырье и минимизировать отходы, что имеет важное значение с точки зрения устойчивости производства.

Анализ литературы позволяет выделить несколько ключевых направлений исследований. Во-первых, это разработка математических моделей, которые позволяют оптимизировать цепи поставок и объемы производства с учетом различных параметров и ограничений [3, 8, 9]. Во-вторых, это исследования в области управления запасами и оптимизации производственных процессов [1, 12, 13], включая технологию раскроя [14–16]. В-третьих, это исследование влияния внешних факторов, таких как изменения климата и экологические стандарты [17–19], на управление цепями поставок и производством в лесопромышленной отрасли [20, 21].

Кроме того, следует отметить значительные преимущества применения информационных технологий и современных методов анализа данных в решении задач оптимизации. Внедрение цифровых решений и аналитических инструментов позволяет компаниям более точно прогнозировать спрос, оптимизировать запасы и ресурсы, а также управлять сложными цепями поставок [22].

Несмотря на значительные достижения, в данной области остаются нерешенные проблемы и вызовы. Сопротивление изменениям со стороны сотрудников и поставщиков, а также изменяющаяся мировая экономическая ситуация представляют собой серьезные препятствия. Более того, существует необходимость в разработке инновационных подходов к управлению цепями поставок и производством, учитывая быстро меняющиеся условия и требования рынка.

С учетом вышесказанного можно утверждать, что проблема, которая затрагивает определение цены готовой продукции в совокупности с задачами определения объемов производства, формирования цепей поставок сырья и транспортировки готовой продукции до покупателей является важной и актуальной.

Критерием более эффективной модели будем считать количество итераций, которое потребовалось алгоритму, чтобы достичь решения, которое с ростом итераций значительно не изменяется. Наиболее близкой работой в литературе выступает исследование [13]. Результаты работы предлагаемой автором модели в основном сравниваются с выходными данными модели из статьи [13].

## 2. Цели и задачи исследования

В работе [13] рассмотрена модель деятельности предприятий лесопромышленной отрасли, на которую мы опираемся в ходе данного исследования. В

модели, представленной в настоящей работе, учитываются три ключевых производственных процесса: поставки и объемы закупок сырья с внутреннего рынка региона, объемы производства с учетом спроса на каждый тип продукции и имеющихся запасов сырья, а также способы доставки готовой продукции до покупателей. При этом рассматривается технология производства, основанная на раскросе поступившего круглого леса на складе.

Обычно предприятия получают заказы от клиентов заблаговременно, что позволяет им планировать деятельность на длительные периоды. Это важно для оптимизации процессов производства, закупок материалов и распределения ресурсов. Однако, следует отметить, что спрос на продукцию лесопромышленной отрасли подвержен сезонным колебаниям, таким как увеличение спроса на отопительные материалы в зимний период и спрос на строительные материалы в летние месяцы. Эти сезонные изменения создают дополнительные вызовы для планирования производства и управления запасами. Однако с помощью адаптивных стратегий и анализа рыночных тенденций компании можно эффективно адаптироваться к изменяющемуся спросу и успешно управлять производственными процессами [13].

Цель данного исследования заключается в разработке математической модели, позволяющей оптимизировать производственные процессы лесопромышленного комплекса, включая определение объема выпуска продукции с использованием технологии раскроса круглого леса, закупки сырья на внутреннем рынке, доставки готовой продукции до покупателя, а также формирование ценовой политики предприятия на различных периодах планирования. Основной задачей является оценка целесообразности взаимодействия предприятия с лесной товарно-сырьевой биржей с целью оптимизации производственных процессов и повышения эффективности деятельности компании.

Для достижения цели работы выдвигаются следующие задачи исследования:

1. Построение двухэтапной экономико-математической модели, включающей:
  - a. определение субоптимальных объемов производства продукции по дням на заданном горизонте планирования, цепей поставок сырья и объемов транспортировки сырья и готовой продукции;
  - b. определение цен реализации готовой продукции.

2. Формирование согласованного решения для двух этапов математической модели.
3. Разработка программного обеспечения, позволяющего решать поставленные задачи.
4. Анализ результатов тестирования модели.

### 3. Математическая модель

Для обеспечения бесперебойной работы лесопромышленного комплекса требуются своевременные поставки сырья. Каждый лесозаготовитель (располагается в некотором-то районе региона) уведомляет предприятие о том, что заготовит заданный объем сырья к заранее известной дате и выставит на продажу. Покупатель может выкупить часть лота и отобрать необходимое по характеристикам сырье из штабеля.

После того как на склад производства поступит достаточное количество сырья, у предприятия возникает задача определения оптимального набора производственных операций по технологии раскроса и формирования цен на продукцию, с учетом текущей динамики рыночного спроса. Важно отметить, что изменение цен на продукцию ограничено величиной  $\mu$  за неделю, что требует тщательного планирования и анализа рыночных тенденций. Помимо этого, после разработки плана производства необходимо организовать эффективную логистику доставки продукции покупателям (учитывая их индивидуальные потребности и предпочтения) через известные транспортные узлы. Этот процесс требует согласованной работы между производственными отделами, отделом продаж и логистическими службами, чтобы обеспечить бесперебойное выполнение заказов и удовлетворение потребностей клиентов [13].

Для достижения этой цели требуется разработать математическую модель, которая оптимизирует все описанные выше факторы.

Введем следующие обозначения:

$M$  – рассматриваемый горизонт планирования (дни);

$k$  – тип производимой продукции,  $k = 1, \dots, K$ ;

$len_e$  – длина заготовки типа  $e$  (м);

$width, height$  – ширина и толщина заготовок соответственно (м);

$w(m)$  – номер недели  $w$  в зависимости от номера дня  $m$ , где

$$\mathbb{W}(m) = \frac{m}{7}; \quad (1)$$

$\mathbb{W}(M) = \frac{M}{7}$  – количество недель в зависимости от горизонта планирования;

$c_{imrl}$  – цена покупки 1 м<sup>3</sup> из  $i$ -й заявки сырья типа  $l$  в районе  $r$  в день  $m$  (руб.), стоимость доставки включена;

$c_j$  – общие затраты на транспортировку готовой продукции до покупателя в пункт  $j$  (руб.);

$b_{et}$  – количество раз, когда заготовка типа  $t$  встречается в раскрое типа  $t$  (в литературе множество  $\{b_{et}\}$  обычно называется картой раскроя);

$V_{imrl}$  – объем сырья типа  $l$  в заявке  $i$  из района  $r$  в день  $m$  (м<sup>3</sup>);

$\bar{u}$  – максимальная вместимость склада (м<sup>3</sup>);

$\bar{O}$  – максимальное количество раскроев в день (ед.);

$v'_{imrl}$  – объемы сырья типа  $l$  в заявке  $i$  из района  $r$ , купленные в предыдущем периоде, про которые известно, что они поступят на склад в день  $m$  (м<sup>3</sup>);

$p_{kml}$  – цена продажи продукции типа  $k$ , изготовленной из сырья типа  $l$ , в день  $m$  (м<sup>3</sup>);

$I'$  – количество лотов, которые были куплены в предыдущий период (до  $m = 0$ , при этом дата их поступления на склад заранее известна);

$R$  – количество районов;

$T_r$  – норма затрат времени (в днях) на доставку любого объема сырья из района  $r$  по железной дороге;

$Q_{jkwl}$  – объем спроса розничной компании  $j$  на продукцию типа  $k$ , произведенную из ресурса типа  $l$ , в течение недели  $w$ ;

$\dot{Q}_{jkwl}$  – математическое ожидание объема спроса розничной компании  $j$  на продукцию типа  $k$ , произведенную из ресурса типа  $l$ , в течение недели  $w$ ;

$J^*$  – количество компаний розничной торговли (конечные пункты доставки произведенной продукции);

$Bud_0$  – начальный бюджет предприятия;

$month(m)$  – номер месяца в зависимости от номера дня;

$A_{ekl}^{month(m)}$  – количество заготовок типа  $e$ , использованных для производства единицы продукции типа  $k$  из ресурса типа  $l$  в течение месяца  $month(m)$  (ед.);

$Iter$  – количество независимых итераций (ед.);

$FC$  – постоянные затраты за день работы предприятия (руб.);

$V$  – объем плиты (м<sup>3</sup>);

$\tilde{L}$  – длина плиты (м);

$x_{kml}$  – объем производства продукции типа  $k$ , изготовленной из сырья типа  $l$ , в день  $m$  (шт.);

$z_{jkwl}$  – объем транспортировки продукции типа  $k$ , изготовленной из сырья типа  $l$ , до пункта  $j$  в течение недели  $w(m)$  (ед.);

$q_{iml}$  – количество раскроев типа  $t$  из сырья типа  $l$  в день  $m$  (ед.);

$v_{imrl}$  – объем закупки сырья типа  $l$  из заявки  $i$  из района  $r$  в день  $m$  (м<sup>3</sup>);

$u_{ml}$  – запасы на складе сырья типа  $l$  на начало дня  $m$  (м<sup>3</sup>);

$\tilde{u}_{eml}$  – объем запасов заготовок типа  $e$  из сырья  $l$  на начало дня  $m$ .

В качестве целевой функции будем рассматривать значение операционной прибыли предприятия на горизонте планирования  $M$  (2):

Задача оптимизации имеет следующие ограничения:

$$\max_{p,x,v,z} \sum_m \left( \sum_{k,l} p_{kml} x_{kml} - \sum_{i,l,r} c_{imrl} v_{imrl} - \sum_{j,k,l} c_j z_{jkwl(m)l} \right). \quad (2)$$

$$\tilde{u}_{eml} = \tilde{u}_{e(m-1)l} + \sum_t b_{et} q_{iml} - \sum_k A_{ekl}^{month(m)} x_{kml}, \quad e = 1: E, m = 1: M, l = 1: L, \quad (3)$$

$$\sum_{t,l} q_{iml} \leq \bar{O}, m = 1: M, \quad (4)$$

$$\sum_{m=7(w-1)+1}^{7w} x_{kml} \leq \sum_j z_{jkwl}, \quad m = 1: M, k = 1: K, l = 1: L, \quad (5)$$

$$z_{jkwl} \leq Q_{jkwl}, j = 1: J^*, k = 1: K, w = 1: \mathbb{W}, l = 1: L, \quad (6)$$

$$\sum_t \left( u_{ml} + \sum_e \tilde{u}_{eml} \cdot len_e \cdot height \cdot width \right) \leq \bar{u}, m = 1: M, \quad (7)$$

$$x_{kml}, q_{iml}, z_{jkwl} \in Z^+, \quad (8)$$

$$\tilde{u}_{eml}, u_{ml}, v_{imrl} \geq 0, \quad (9)$$

$$v_{imrl} \leq V_{imrl}, i = 1: I, m = 1: M, r = 1: R, l = 1: L, \quad (10)$$

$$Bud_0 + \sum_{m=1}^{m^*} \left( \sum_{k,l} p_{kml} x_{kml} - \sum_{i,r,l} c_{imrl} v_{imrl} - \sum_{j,k,l} c_j z_{jkwl(m)l} - FC \right) \geq 0, m^* = 1: M, \quad (11)$$

$$u_{ml} = u_{(m-1)l} + \sum_{i,r} v_{i(m-T_r)rl} - \nabla \sum_t q_{iml}, \quad (12)$$

$$Q_{jkwl} = (\dot{Q}_{jkwl} \pm \varepsilon) \cdot e^{\left( \sum_{m=7(w-1)+1}^{7w} \frac{(p_{k(m+7)l} - p_{kml})}{7 \cdot p_{kml}} \right)}, \quad (13)$$

$$p_{k(m+1)l} = p_{kml} \cdot (1 + \varepsilon^{(1)}), \\ m = 1: M - 1, \varepsilon^{(1)} = \left[ -\varepsilon_1^{(1)}; \varepsilon_2^{(1)} \right], \quad (14)$$

$$A_{ekl}^{month(m)} = \max(0; \min(A_{ekl}^{month(m)}, A_{ekl}^{month(m)} + \varepsilon^{(2)})), \varepsilon^{(2)} = \\ = \left[ -\varepsilon_1^{(2)}; \varepsilon_2^{(2)} \right], \quad (15)$$

$$FC_{\mu} \in \left[ \alpha^1, \beta^1 \right], \quad (16)$$

$$Z_{ijkw} \in \left[ \alpha^2, \beta^2 \right], \quad (17)$$

$$c_{ijw} \in \left[ \alpha^3, \beta^3 \right], \quad (18)$$

где  $\varepsilon, \varepsilon^{(1)}, \varepsilon^{(2)}$  – равномерно распределенные случайные величины непрерывного типа;

$$\forall, Bud_0, \tilde{u}_{e0l}, u_{0l}, A_{ekl}^{month(0)}, p_{kml} = const;$$

$$\varepsilon^{(1)} \leq \varepsilon \leq \varepsilon^{(2)}; 0 < \varepsilon_1^1 < 1; 0 < \varepsilon_2^1 < 1; \varepsilon_1^2 > 0; \varepsilon_2^2 > 0;$$

$$\varepsilon^{(1)}, \varepsilon^{(2)}, \alpha^1, \alpha^2, \alpha^3, \beta^1, \beta^2, \beta^3 = const.$$

Рассмотрим более подробно ограничения (3–18) задачи оптимизации.

Ограничение (3) дает представление о том, какие запасы заготовок должны быть на складе в течение всего периода планирования для обеспечения непрерывности производства.

Ограничение (4) устанавливает максимальное количество листов, доступных для раскроя в день, что важно для оптимизации использования материалов и производства.

Ограничение (5) контролирует как объем производства продукции в течение каждой недели, так и объем транспортировки, хотя при целевой функции вида (2) оно может быть рассмотрено как равенство. Это ограничение оказывает непосредственное влияние на управление запасами и логистику.

Ограничение (6) гарантирует, что объем транспортировки до конечных точек не превышает объем спроса в этих точках, что важно для эффективной доставки продукции и удовлетворения потребностей клиентов.

Ограничение (7) описывает степень заполненности склада.

Далее, ограничения (8–9) определяют тип переменных, а (10) ограничивает объемы ежедневно закупаемого сырья размерами заявок на бирже. Эти ограничения являются основой для планирования закупок и управления запасами.

Ограничение (11) гарантирует, что ежедневная прибыль будет неотрицательной, что важно для финансовой устойчивости предприятия.

Ограничение (12) определяет наличие запасов сырья на складе, что необходимо для обеспечения бесперебойного производства.

Ограничение (13) отражает взаимозависимость спроса и цен на сырье (в отличие от аналогичной функции, использованной в работе [13], вторая производная данной функции не имеет разрыва).

Ограничение (14) определяют рекуррентную зависимость цены от номера дня, что помогает учесть динамику изменения цен на рынке.

Ограничение (15) отражает нормы потребления заготовок на производство каждой единицы продукции, что является ключевым фактором для эффективного использования ресурсов и оптимизации производственных процессов.

Наконец, ограничения (16–18) необходимы для того, чтобы «разыграть» значения постоянных издержек, максимальной пропускной способности транспортного графа при доставке товаров до покупателей, а также значения затрат на доставку товаров.

Модель (3–18) представляет собой стохастическую нелинейную задачу математического программирования. Для решения этой задачи планируется провести итерационный поиск субоптимального решения, используя две подзадачи: оптимизацию плана производства, доставки сырья и готовой продукции, а также поиск субоптимального вектора цен для реализации продукции. Это подход позволит эффективно управлять сложными процессами и минимизировать стоимость производства продукции и ее доставки покупателям:

- 1) Сгенерировать векторы цен  $(p^{(iter)}) = \{p_{kml}^{(iter)}\}_{kml}$ ,  $iter = 1: Iter$  и рассчитать (13) и  $p_{kml}$ .  $Cnt = 0$ ,  $iter_1 = 0$ , а также разыграть значения для (15–18). Перейти к шагу 2.
- 2) Решить задачу (3–13) с зафиксированными значениями  $p^{(iter)}, A_{ekl}^{month(m)}, FC_{\mu}, Z_{ijkw}, c_{ijw}$  с целевой функцией вида (19) с использованием метода ветвей и границ<sup>1</sup>. Положить  $iter_1 = iter_1 + 1$ .

$$\left\{ \max_{x,y,z} \sum_m \left( \sum_{k,l} p_{kml}^{(iter)} x_{kml} - \sum_{i,l,r} c_{imrl} v_{imrl} - \sum_{j,k,l} c_{jkl} z_{jkw(m)l} \right) \right\}_{iter} \cdot (19)$$

<sup>1</sup> MathWorks. Documentation. Mixed-Integer Linear Programming Algorithms. <https://it.mathworks.com/help/optim/ug/mixed-integer-linear-programming-algorithms.html>

Вычислить (20) и перейти к шагу 3.

$$\tilde{p}_{kml} = p_{kml}^{\arg \max(\pi(iter_1))}. \quad (20)$$

- 3) Если  $\arg \max(\pi(iter)) = 1$ , то  $Cnt = Cnt + 1$ , иначе  $Cnt = 0$ . Перейти к шагу 4.
- 4) Если  $Cnt = g$ , выйти из алгоритма, иначе перейти к шагу 5.
- 5) Сгенерировать векторы цен  $(p^1 = \{\tilde{p}_{kml}\}_{kml}, p^{(iter)} = \{p_{kml}^{(iter)}\}_{kml}, iter = 2 : Iter)$  (21–22).

$$\varepsilon^1 \in \left[ -(\varepsilon_1^{(1)})^{Cnt+1}, (\varepsilon_2^{(1)})^{Cnt+1} \right]. \quad (21)$$

$$p_{kml}^{(iter)} = \min \left[ \max \left( \tilde{p}_{kml} \cdot (1 - \varepsilon_1^{(1)}); \tilde{p}_{kml} \cdot (1 + \varepsilon_2^{(1)}) \right); \tilde{p}_{kml} \cdot (1 + \varepsilon_2^{(1)}) \right]. \quad (22)$$

- 6) Рассчитать (13–14). Перейти к шагу 2.

Модель (2–19) при разыгранных значениях (13–19) относится к классу задач смешано-целочисленного линейного программирования. В качестве среды программирования выберем Matlab. На первом этапе используется метод ветвей и границ для решения задачи (2–19) (при этом значения (13–19) разыграны), а на втором этапе (изменение цены) расчеты выполняются с применением генетического алгоритма. Отметим, что степень близости найденного вектора цен к оптимальному достигается за счет выражения (22).

На практике программная реализация в среде Matlab может быть переведена на любой другой язык программирования (например, Python любой версии) с применением, например, конвертеров языков программирования или нейронных сетей (например, ChatGPT и др.).

#### 4. Калибровка

Проведем тестирование модели на данных ООО «ДНС-Лес»<sup>2</sup> (далее – «предприятие»). В конце каждого дня торгов фиксируются данные о совершенных сделках. На основе этой статистики проведем оценку целесообразности взаимодействия одного из крупных и одновременно молодых предприятий Приморского края с товарно-сырьевой биржей.

Исходя из статистики биржи, в торгах участвовали предприятия по лесозаготовке из пяти рай-

онов в качестве продавцов-поставщиков сырья ( $r=1:5$ ). На горизонте планирования с 01.02.2018 по 31.11.2018 был получен массив следующих данных: цены ( $c_{imrl}$ ), даты ( $m$ ) выставления лота на торги, объемы сырья ( $v_{imrl}$ ) в эти дни, цены продукции ( $p_{kml}$ ), количество заявок по каждому типу сырья. Кроме того, исходя из статистики продаж предприятия, известен спрос  $\dot{Q}_{jkwl}$  на каждый вид продукции в течение каждой недели [12].

Положим, что цена каждый день не может меняться более, чем на десять процентов. Пределы значений случайных величин представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Пределы значений случайных величин

| Параметры | $\varepsilon_1^{(1)}$ | $\varepsilon_1^{(2)}$ | $\varepsilon_2^{(1)}$ | $\varepsilon_2^{(2)}$ | $\varepsilon^{(1)}$ | $\varepsilon^{(2)}$ |
|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| Значения  | 0,03                  | 0,03                  | 1                     | 10                    | 2                   | 2                   |

Для поиска решения воспользуемся языком программирования Matlab, а именно – функцией *intlinprog*<sup>3</sup>. Задача имеет значительную размерность, что делает невозможным гарантировать нахождение оптимального решения в короткие сроки ввиду алгоритмической сложности метода ветвей и границ (объем вычислений растет неполиномиально), который по умолчанию выбран в качестве метода поиска решения в *intlinprog*. Поэтому было принято решение ограничить количество исследуемых вариантов решений до  $10^7$ . Если алгоритм завершает работу из-за этого ограничения, то найденное решение рассматривается не как оптимальное, а как субоптимальное. Полученные результаты представлены на рисунках 1–5.

Отдельно отметим, что в связи с корпоративной этикой в работе не указывается реальный зафиксированный спрос  $\dot{Q}_{nkm}$ . Однако, данные о спросе  $ave\left(\sum_n Q_{nkm}\right)$  представлены на рисунках 3, 4.

#### 5. Результаты апробации

Рассмотрим рисунки 1–5, на которых представлены основные результаты тестирования модели. На рисунке 1 можно увидеть, как менялось значение прибыли на каждой итерации  $iter_1$ . Введем обозначение  $\pi_m(iter_1)$ , которое отражает накопленное значение прибыли ко дню  $m$  на итерации  $iter_1$ . Ос-

<sup>2</sup> Официальный сайт предприятия ООО «ДНС-Лес». Россия, Приморский край, г. Спасск-Дальний. <http://dns-les.ru/>

<sup>3</sup> Intlinprog. Документация. MathWorks. <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html>

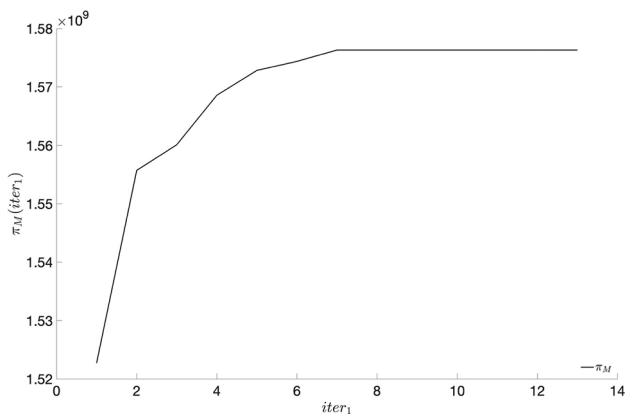


Рис. 1. Визуализация значений накопленной прибыли в зависимости от номера итерации  $iter_1$ .

новые изменения значений целевой функции наблюдались на первых семи итерациях. Однако уже после второй итерации значение целевой функции меняется слабо, что указывает на то, что новый метод более эффективно решает проблемы подобного рода по сравнению с алгоритмом, описанным в работе [13].

Для любого решения требуется тестирование на устойчивость. Для этого заново запустим разработанную модель четыре раза и найдем соответствующие решения. Результаты такого теста изложены на рисунке 2. Несмотря на достаточно большой разрыв между решениями в значении целевой функции к концу горизонта планирования, можно увидеть, что для каждого решения отклонения в

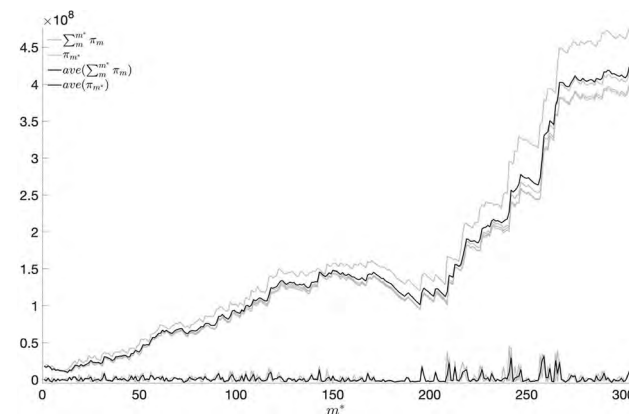


Рис. 2. Визуализация тестирования полученного решения.

относительных величинах незначительны для всех траекторий значений  $\pi_m$ .

Отдельный интерес представляет тот факт, что после окончания летнего периода и ближе к зиме прибыль предприятия растет. Это связано с тем, что объем добычи к зимнему периоду растет и цены на сырье падают.

Важным фактором является не только цены на сырье, но и значения цен на продукцию, производимую предприятием. Как показано на рисунке 3, наиболее интересными рынок считает продукты № 6 (из сырья типа ) и № 9 (из сырья типа ). Это может быть связано с нормой затрат на сырье для производства этой продукции  $A_{ekl}^{month(m)}$ .

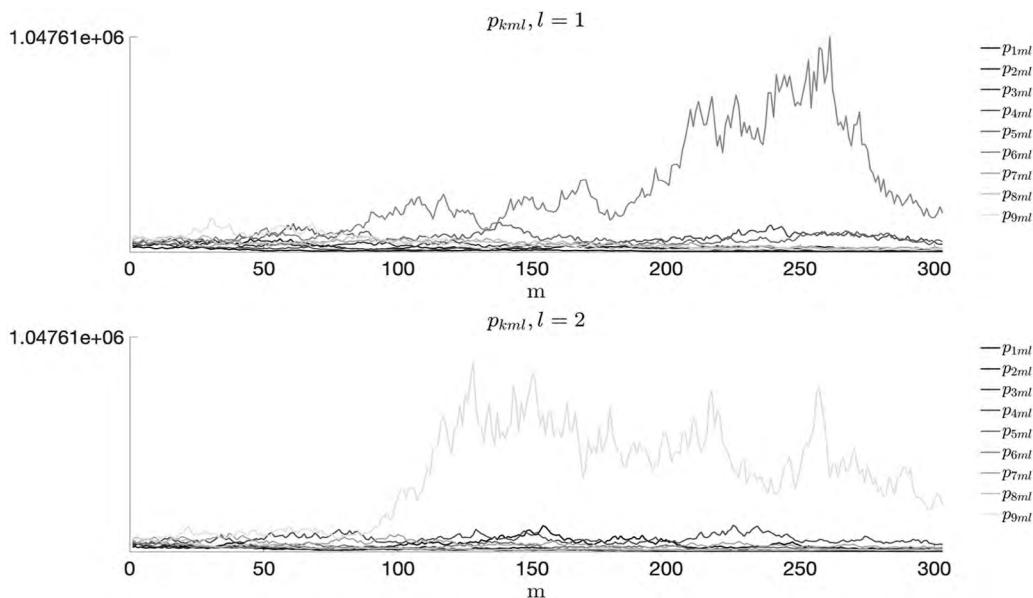


Рис. 3. Визуализация изменения цен на всем горизонте планирования.



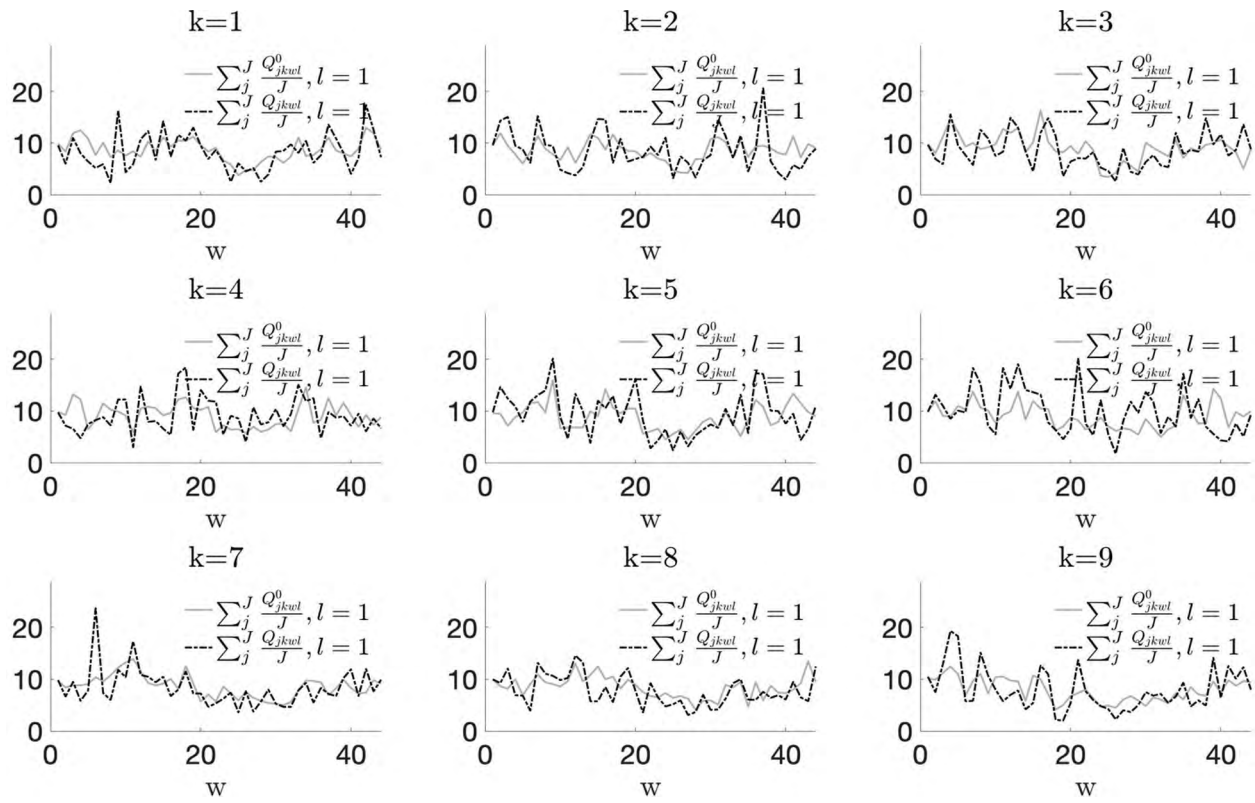


Рис. 4. Визуализация исходного и текущего спроса с учетом изменений при поиске вектора цен для  $l = 1$ .

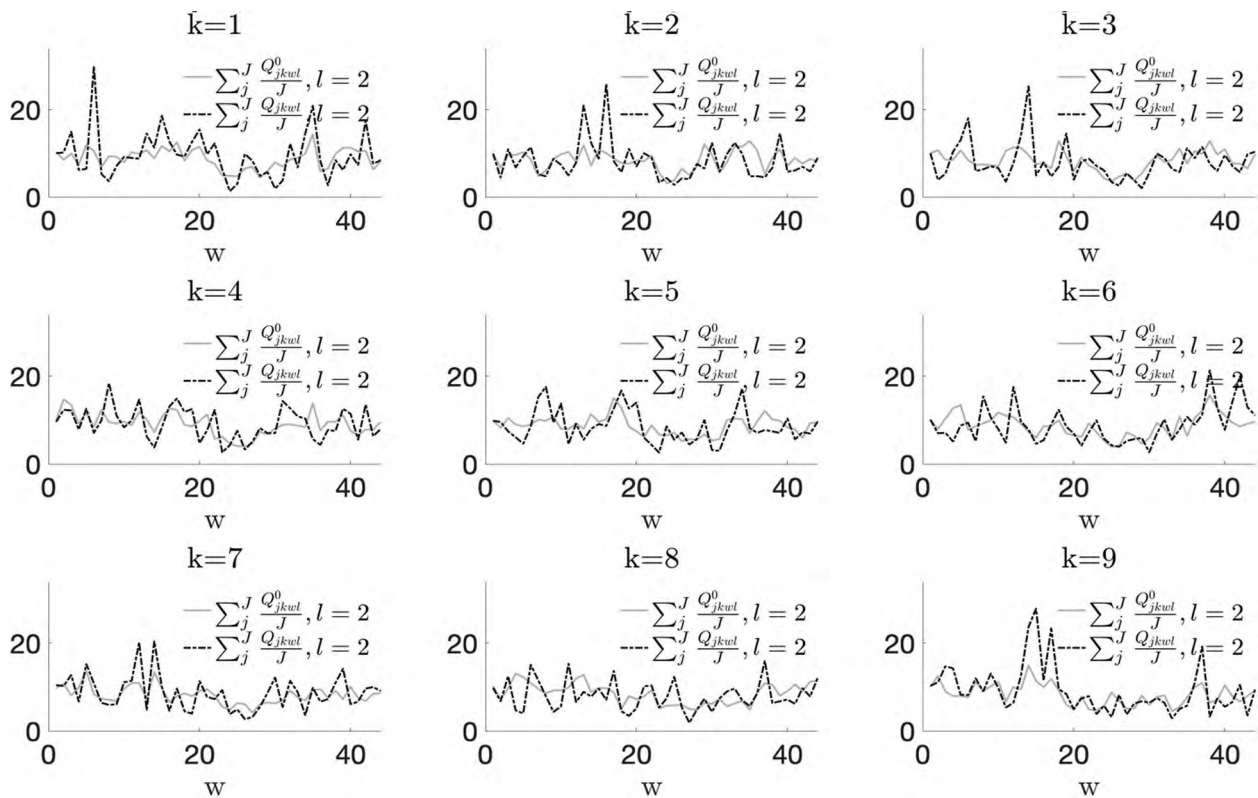


Рис. 5. Визуализация исходного и текущего спроса с учетом изменений при поиске вектора цен для  $l = 2$ .

Однако рост цен также подразумевает изменение спроса на продукцию. Введем обозначение  $Q_{jkwt}^0$ , которое задает траекторию изменения спроса в соответствии с новыми (рассчитанными) значениями цен. Рисунки 4, 5 отражают поведение спроса на продукцию на всем горизонте планирования для каждой недели.

Отдельный интерес представляют объемы отходов (м<sup>3</sup>), которые появляются при раскросе поступающего сырья. Для этого рассмотрим рисунок 6. Здесь, как и в случае с траекторией значения прибыли в зависимости от решения, можно наблюдать небольшое отклонение от усредненных значений объемов отходов. Незначительные отклонения в показателях накопленной прибыли и суммарных отходов означают высокую степень прогнозируемости ситуации на предприятии, что является крайне важной характеристикой в текущей турбулентной экономической среде.

Рассмотрим положительные и отрицательные стороны разработанных модели и алгоритма и предложим варианты по их модификации.

К достоинствам разработанных предложений можно отнести следующие:

1. Возросшая скорость поиска решения по сравнению со схемой, предложенной в работе [13].
2. Учет технологии раскроса круглого леса.
3. По сравнению с работой [13] вторая производная функции спроса непрерывна, что гарантирует

отсутствие моментального ускорения значения спроса при переходе через точку ноль.

К отрицательным сторонам можно отнести следующие:

1. Несмотря на то, что функция (13) имеет непрерывные как первую, так и вторую производные, она имеет определенные недостатки. На рисунках 4 и 5, отражающих соотношение спроса и цен, видно, что цены на продукты, в наибольшей степени интересующие рынок, довольно сильно завышены и держатся на этом уровне достаточно долго. Это связано с тем, что спрос в соответствующие дни снижался лишь в период роста цен, после чего его величина держалась в небольшой окрестности от изначального значения, поскольку цены почти не менялись. Однако в реальной экономике это невозможно, поскольку в течение последующих периодов планирования спрос также испытывает давление высоких цен. Для того, чтобы учесть данный аспект, необходимо модернизировать функцию соотношения спроса и цен.
2. Не исследована сходимость алгоритма.
3. Быстро растущая размерность задачи.
4. Изменение цен в редких случаях происходит каждый день.
5. Для достижения диверсификации источников сырья необходимо добавить возможность закупать сырье с регионального рынка, как это описано в работе [13].
6. Отсутствует учет возможности кредитования.

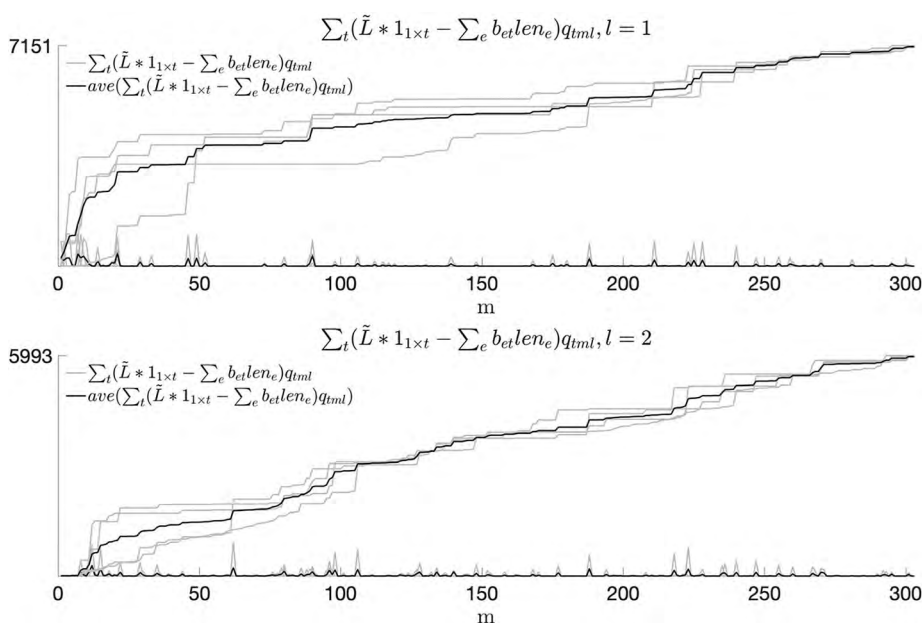


Рис. 6. Визуализация объемов суммарных отходов сырья.

### Заключение

В работе представлена математическая модель для решения комплексной задачи субоптимального расчета ценовой политики предприятия лесопромышленной отрасли с учетом процесса формирования устойчивых цепей поставок с товарно-сырьевой биржи и расчета объемов производства и транспортировки готовой продукции до потребителей. Эта модель дополнительно отличается тем, что позволяет учитывать технологию раскроя сырья, что имеет важное значение для данной отрасли.

Центральной задачей модели является максимизация операционной прибыли предприятия, что представляет собой сложную математическую задачу. Модель учитывает различные аспекты, такие как производственные нормы потребления сырья, стратегию закупок на товарно-сырьевой бирже, объемы транспортировки готовой продукции и ценовую политику компании. Для решения такой

сложной задачи была разработана двухэтапная схема оптимизации, включающая линейную оптимизацию и применение генетического алгоритма.

Апробация модели выполнена с использованием реальных данных лесоперерабатывающего комплекса Приморского края. Как показала апробация, новая схема оптимизации позволяет находить решение быстрее, чем это было в предыдущей версии модели, основанной на методе градиентного спуска.

Результаты экспериментов позволили сформулировать ценные рекомендации для управленческого состава компании в части взаимодействия с лесозаготовителями и совершенствования производственных процессов.

Дальнейшие исследования могут включать модификацию модели для учета вероятностных экономических факторов и улучшения методов поиска решений. Также следует рассмотреть возможности ускорения поиска решения и разработать более точные функции спроса на продукцию предприятия. ■

### Литература

1. Wieruszewski M., Turbański W., Mydlarz K., Sydor M. Economic efficiency of pine wood processing in furniture production // *Forests*. 2023. No. 14. Article 688. <https://doi.org/10.3390/f14040688>
2. Trigkas M., Papadopoulos I., Karagouni G. Economic efficiency of wood and furniture innovation system // *European Journal of Innovation Management*. 2012. Vol. 15. No. 2. P. 150–176. <https://doi.org/10.1108/14601061211220959>
3. Larsson M., Stendahl M., Roos A. Supply chain management in the Swedish wood products industry – a need analysis // *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2016. Vol. 31. P. 777–787. <https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1170874>
4. Chang H., Han H.-S., Anderson N., Kim Y.-S., Han S.-K. The cost of forest thinning operations in the Western United States: A systematic literature review and new thinning cost model // *Journal of Forestry*. 2023. Vol. 121. P. 193–206. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvac037>
5. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Pakrastins L. Cost factor analysis for timber–concrete composite with a lightweight plywood rib floor panel // *Buildings*. 2022. Vol. 12. No. 6. Article 761. <https://doi.org/10.3390/buildings12060761>
6. Aryal U., Neupane P.R., Rijal B., Manthey M. Timber losses during harvesting in managed Shorea Robusta forests of Nepal // *Land*. 2022. Vol. 11. Article 67. <https://doi.org/10.3390/land11010067>
7. Numazawa C.T.D., Numazawa S., Pacca S., John V.M. Logging residues and CO2 of Brazilian Amazon timber: Two case studies of forest harvesting // *Resources Conservation and Recycling*. 2017. Vol. 122. P. 280–285. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.016>
8. Zubair M., Abbas Z., Hussain S. B. Factor affecting purchase of quality wood: Understanding perceptions of wood workers using logistic regression model // *Asian Journal of Research in Agriculture and Forestry*. 2022. Vol. 8. P. 243–248. <https://doi.org/10.9734/ajraf/2022/v8i4184>
9. Hosseini S.M., Peer A. Wood products manufacturing optimization: A survey // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 121653–121683. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3223053>
10. A novel NIRS modelling method with OPLS-SPA and MIX-PLS for timber evaluation / J. Chen [et al.] // *Journal of Forestry Research*. 2021. Vol. 33. P. 369–376.
11. Stefańska A., Cygan M., Batte K., Pietrzak J Application of timber and wood-based materials in architectural design using multi-objective optimisation tools // *Construction Economics and Building*. 2021. Vol. 21. P. 1–5. <https://doi.org/10.5130/AJCEB.v21i3.7642>
12. Рогулин П.С. Влияние подзадачи о раскрое при оценке целесообразности проведения закупок лесного сырья с товарно-сырьевых бирж // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2021. № 2. С. 109–125.
13. Рогулин П.С. Математическая модель формирования ценовой политики и плана производственно-транспортной системы лесопромышленного предприятия // *Бизнес-информатика*. 2021. Т. 15. № 3. С. 60–77. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.3.60.77>

14. Лапшин В.П., Туркин И.А., Омелечко В.Ю. Разработка математической модели сверления древесины с учетом взаимного влияния электроприводов подачи и резания // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. № 2. С. 48–53.
15. Cutting force and surface roughness during straight-tooth milling of walnut wood / S. Jiang [et al.] // Forests. 2022. Vol. 13. Article 2126. <https://doi.org/10.3390/f13122126>
16. Generalized cutting force model for peripheral milling of wood, based on the effect of density, uncut chip cross section, grain orientation and tool helix angle / R. Curti [et al.] // European Journal of Wood and Wood Products. 2021. No. 79. P. 667–678. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01667-5>
17. Merve E.K., Abhijeet Gh., Umit S.B. Modelling the impact of climate change risk on supply chain performance // International Journal of Production Research. 2021. Vol. 59. P. 7317–7335. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1849844>
18. Abdullah A.H.A., Umar M.M., Ali Ak.Sh., Irfan A. Multi-objective optimization modelling of sustainable green supply chain in inventory and production management // Alexandria Engineering Journal. 2021. Vol. 60. P. 5129–5146. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.075>
19. Astanti R.D., Daryanto Y., Dewa P.K. Low-carbon supply chain model under a vendor-managed inventory partnership and carbon cap-and-trade policy // Journal of Open Innovation Technology Market and Complexity. 2022. Vol. 8. Article 30. <https://doi.org/10.3390/joitmc8010030>
20. Timber tracking in a mountain forest supply chain: A case study to analyze functionality, bottlenecks, risks, and costs / G. Pichler [et al.] // Forests. 2022. Vol. 13. Article 1373. <https://doi.org/10.3390/f13091373>
21. A new wooden supply chain model for inventory management considering environmental pollution: A genetic algorithm / B. Abdollah [et al.] // Foundations of Computing and Decision Sciences. 2022. Vol. 47. P. 383–408. <https://doi.org/10.2478/fcds-2022-0021>
22. Роголин Р.С. Обзор прикладных основ использования аналитики данных и машинного обучения в прогнозировании спроса // Экономические и социально-гуманитарные исследования. 2023. № 3. С. 115–126.

### Об авторе

#### Роголин Родион Сергеевич

к.э.н.;

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

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3235-6429

# Management of pricing policy of a timber enterprise considering the problems of formation of raw material supply chains and determining production volumes

#### Rodion S. Rogulin

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

Vladivostok State University, Vladivostok, Russia

## Abstract

This paper considers a mathematical model that allows managers of a timber enterprise to develop supply chains and manage the pricing policy of the organization. This model is a modification of the model developed earlier and differs from it by taking into account the technology of raw material cutting. The model takes into account the consumption rates of raw materials, purchases on the commodity exchange, transportation of products and pricing policy of the enterprise taking into account the demand. The purpose of the model is to maximize the value of operating profit of the enterprise. When searching for a solution, an optimization strategy is applied which includes two stages: application of linear optimization at the first stage and genetic algorithm at the second stage. As a result of testing the model at one of the timber processing enterprises in the Primorsky Territory, data were obtained, based on which recommendations are formulated for managers of the company regarding cooperation with loggers. This work represents an important step in the development of supply chain management methodology in the timber industry, taking into account the technology of raw material cutting. Further research may include modification of the model using stochastic factors, improving decision-making methods and development of more accurate product demand functions. The work has practical significance for enterprises of the timber processing industry, since it can contribute to the improvement of their production processes and increase profits.

**Keywords:** supply chain, production volume, timber enterprises, optimality of decisions, mathematical model, commodity and raw materials exchange, share of the useful volume of raw materials, transit time, rational raw material transactions, increasing efficiency

**Citation:** Rogulin R.S. (2024) Management of pricing policy of a timber enterprise considering the problems of formation of raw material supply chains and determining production volumes. *Business Informatics*, vol. 18, no. 4, pp. 98–111. DOI: 10.17323/2587-814X.2024.4.98.111

## References

1. Wieruszewski M., Turbański W., Mydlarz K., Sydor M. (2023) Economic efficiency of pine wood processing in furniture production. *Forests*, vol. 14, article 688. <https://doi.org/10.3390/f14040688>
2. Trigkas M., Papadopoulos I., Karagouni G. (2012) Economic efficiency of wood and furniture innovation system. *European Journal of Innovation Management*, vol. 15, no. 2, pp. 150–176. <https://doi.org/10.1108/14601061211220959>
3. Larsson M., Stendahl M., Roos A. (2016) Supply chain management in the Swedish wood products industry – a need analysis. *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 31, pp. 777–787. <https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1170874>
4. Chang H., Han H.-S., Anderson N., et al. (2023) The cost of forest thinning operations in the Western United States: A systematic literature review and new thinning cost model. *Journal of Forestry*, vol. 121, no. 2, pp. 193–206. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvac037>
5. Buka-Vaivade K., Serdjuks D., Pakrastins L. (2022) Cost factor analysis for timber–concrete composite with a lightweight plywood rib floor panel. *Buildings*, vol. 12, no. 6, article 761. <https://doi.org/10.3390/buildings12060761>
6. Aryal U., Neupane P.R., Rijal B., Manthey M. (2022) Timber losses during harvesting in managed Shorea Robusta forests of Nepal. *Land*, vol. 11, article 67. <https://doi.org/10.3390/land11010067>
7. Numazawa C.T.D., Numazawa S., Pacca S., John V.M. (2017) Logging residues and CO<sub>2</sub> of Brazilian Amazon timber: Two case studies of forest harvesting. *Resources Conservation and Recycling*, vol. 122, pp. 280–285. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.016>
8. Zubair M., Abbas Z., Hussain S. B. (2022) Factor affecting purchase of quality wood: Understanding perceptions of wood workers using logistic regression model. *Asian Journal of Research in Agriculture and Forestry*, vol. 8, pp. 243–248. <https://doi.org/10.9734/ajraf/2022/v8i4184>
9. Hosseini S.M., Peer A. (2022) Wood products manufacturing optimization: A survey. *IEEE Access*, vol. 10, pp. 121653–121683. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3223053>
10. Chen J., Yu H., Jiang D., et al. (2021) A novel NIRS modelling method with OPLS-SPA and MIX-PLS for timber evaluation. *Journal of Forestry Research*, vol. 33, pp. 369–376.
11. Stefańska A., Cygan M., Batte K., Pietrzak J. (2021) Application of timber and wood-based materials in architectural design using multi-objective optimization tools. *Construction Economics and Building*, vol. 21, pp. 1–5. <https://doi.org/10.5130/AJCEB.v21i3.7642>

12. Rogulin R.S. (2021) The influence of the cutting subtask when assessing the feasibility of purchasing forest raw materials from commodity exchanges. *Bulletin of Voronezh State University. Series: System analysis and information technologies*, no. 2, pp. 109–125 (in Russian).
13. Rogulin R.S. (2021) Mathematical model for the formation of pricing policy and plan for the production and transport system of a timber industry enterprise. *Business Informatics*, vol. 15, no. 3, pp. 60–77. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.3.60.77>
14. Lapshin V.P., Turkin I.A., Omelechko V.Yu. (2021) Development of a mathematical model for drilling wood taking into account the mutual influence of electric drives for feeding and cutting. *Electrical Technologies and Electrical Equipment in the Agro-industrial Complex*, no. 2, pp. 48–53 (in Russian).
15. Jiang S., Buck D., Tang Q., et al. (2022) Cutting force and surface roughness during straight-tooth milling of walnut wood. *Forests*, vol. 13, article 2126. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/f13122126>
16. Curti R., Marcon B., Denaud L., et al. (2021) Generalized cutting force model for peripheral milling of wood, based on the effect of density, uncut chip cross section, grain orientation and tool helix angle. *European Journal of Wood and Wood Products*, no. 79, pp. 667–678. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01667-5>
17. Merve E.K., Abhijeet Gh., Umit S.B. (2021) Modelling the impact of climate change risk on supply chain performance. *International Journal of Production Research*, vol. 59, pp. 7317–7335. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1849844>
18. Abdullah A.H.A., Umar M.M., Ali Ak.Sh., Irfan A. (2021) Multi-objective optimization modelling of sustainable green supply chain in inventory and production management. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, vol. 60, pp. 5129–5146. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.075>
19. Astanti R.D., Daryanto Y., Dewa P.K. (2022) Low-carbon supply chain model under a vendor-managed inventory partnership and carbon cap-and-trade policy. *Journal of Open Innovation Technology Market and Complexity*, vol. 8, article 30. <https://doi.org/10.3390/joitmc8010030>
20. Pichler G., Sandak J., Picchi G., et al. (2022) Timber tracking in a mountain forest supply chain: A case study to analyze functionality, bottlenecks, risks, and costs. *Forests*, vol. 13, article 1373. <https://doi.org/10.3390/f13091373>
21. Abdollah B., Peiman Gh., Adel P.Ch., et al. (2022) A new wooden supply chain model for inventory management considering environmental pollution: A genetic algorithm. *Foundations of Computing and Decision Sciences*, vol. 47, pp. 383–408. <https://doi.org/10.2478/fcds-2022-0021>
22. Rogulin R.S. (2022) Review of applied fundamentals of using data analytics and machine learning in demand forecasting. *Economic and Social-Humanitarian Studies*, no. 3, pp. 115–126 (in Russian).

### About the author

#### Rodion S. Rogulin

Cand. Sci. (Econ.);

Associate Professor, Department of Mathematics and Modeling, Vladivostok State University, 41, Gogolya St., Vladivostok 300012, Russia;

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3235-6429