

# SCM на лесоперерабатывающем производстве с технологией раскroя с учетом рисков

Р. С. Рогулин

Владивостокский государственный университет, Владивосток, Россия

**Аннотация.** В статье рассматривается применение прикладных математических методов в управлении цепями поставок на лесоперерабатывающих производствах, с акцентом на инновационную технологию раскroя и анализе внешних рисков. Для отработки метода было взято лесопромышленное предприятие без собственных источников сырья (делян), которое ставит себе целью каждый день решать задачу формирования цепей поставок сырья с биржи и оптимальной загрузки цехов производства. В качестве источника сырья рассматривается товарно-сырьевая биржа, где лоты появляются каждый день в разных регионах в случайному порядке. Рассмотрена математическая модель, которая представляет собой механизм принятия решения в каждый отдельный день на всем горизонте планирования. Данная модель позволяет учитывать технологию раскroя, время лота в пути в условиях неопределенности. Дополнительным отличием является то, что поиск решения опирается на рассчитанные оптимальные траектории запасов сырья на складе за аналогичные предыдущие периоды планирования. Модель протестирована на данных товарно-сырьевой биржи России и одного из предприятий Приморского края. Анализ полученных решений показал, что даже при достаточно сложном сценарии развития событий, модель показывает качественно высокие результаты.

**Ключевые слова:** формирование цепочек поставок, объемы производства, лесоперерабатывающие предприятия, приближенное решение, математическая модель, товарно-сырьевая биржа, время лотов в пути.

DOI 10.14357/20718632240310

EDN QMGNDY

## Введение

В современной экономике эффективное управление цепями поставок представляет собой ключевой аспект успешного функционирования различных производственных отраслей. Особое внимание уделяется лесоперерабатывающей промышленности, где оптимизация процессов и учет внешних рисков играют решающую роль в обеспечении стабильности и конкурентоспособности предприятий [1-5]. Проблема управления цепями поставок в лесоперерабатывающей отрасли становится все более актуальной в условиях динамично меняющегося рынка и растущей конкуренции [6-10].

Технология раскroя, представляющая собой систему оптимального распределения и использования лесоматериалов, приобретает более высокую степень важности, как инструмент для повышения эффективности производственных процессов. Внедрение математических методов и моделей в управление цепями поставок на лесоперерабатывающих предприятиях позволяет не только оптимизировать производственные операции, но и учитывать внешние факторы, которые могут оказывать влияние на процесс поставок и стабильность производства [11-15].

Анализ внешних рисков в контексте управления цепями поставок в лесоперерабатывающей промышленности представляет собой сложную

задачу, требующую системного подхода и использования современных методов математического моделирования [16-20]. Текущее исследование направлено на разработку интегрированных математических моделей, способных учесть сложные взаимосвязи между процессами управления цепями поставок, технологией раскюя и внешними рисками. Предлагаемый подход модифицирует инструментарий для принятия обоснованных стратегических решений, способствуя повышению устойчивости и конкурентоспособности лесоперерабатывающих предприятий в современных экономических условиях.

## 1. Обзор литературы

Рассматриваемой проблеме посвящено большое количество работ [1-23]. В работе [2] разработана двухступенчатая система обращения с отходами. В этом исследовании используются две подмодели, определяющие концепцию выбора маршрута транспортного средства: эффективный и инновационный маршрут сбора, сортировки отходов и их передачи в центр восстановления. Авторы использовали новый метаэвристический алгоритм для проверки точности задачи. Проведен анализ чувствительности. Авторы работы [3] построили замкнутую цепочку поставок с учетом социальных факторов. В работе использовалась двухкритериальная модель, адаптированная к предполагаемой отрасли. Разработанная модель основывалась на издержках отрасли и социальном факторе. Целевая функция модели была направлена на минимизацию затрат и максимизацию занятости в отрасли.

Коллектив ученых в статье [4] использовал гибридные метаэвристические подходы, основанные на табу-поиске систем производства кабелей. Это исследование отражает результаты моделирования проблемы планирования в кабельной промышленности, где общая стоимость производства была минимизирована. Суть авторского метода сводится к объединению гибридного метаэвристического алгоритма с алгоритмом поиска с запретами. Другой коллектив предложил модель устойчивого планирования принятия решений, учитывающую экологические проблемы на заводах по производству

сахарного тростника [5]. Это модель линейного смешано-целочисленного программирования, которая считается NP-трудной задачей. Для ее решения использовались три метаэвристические генетических алгоритма (GA), имитация отжига и оптимизатор социальной инженерии. Метаэвристические параметры были настроены с использованием подхода Тагучи. Эффективность предложенного ими алгоритма доказывается с помощью дисперсионного анализа (ANOVA).

Авторы работы [6] представили новую модель многокритериального математического программирования для подбора поставщиков с учетом аспектов устойчивого развития. Рассмотрение портфельной теории Марковица было одним из вкладов их статьи. Основной целью их исследования была оценка поставщиков и этапы распределения заказов.

Коллектив ученых в статье [7] представил многоцелевую модель в интуиционистской нечеткой среде. Учитывая экономические и социальные аспекты, удовлетворенность клиентов, авторы внесли вклад в решение проблемы формирования цепей поставок. Для решения модели использовался интуиционистский метод теории нечетких игр. В работе [8] представлена многоцелевая задача транспортировки дробных фиксированных зарядов. Параметры проектируемой модели считаются нечеткими. Решение было найдено с применением метода нечеткой грубой аппроксимации с ограничением шансов. Авторы статьи [9] исследовали стратегию ценообразования в двухканальной цепочке поставок на примере двухуровневой "зеленой" цепочки, состоящей из розничного продавца и производителя, с отдельным каналом продаж для производителя. Используя теорию игр, сравниваются случаи, когда участники решают конкурировать или сотрудничать друг с другом с точки зрения ценообразования и производства.

Авторы исследования [10] рассчитали оптимальные значения цен и стратегию в конкурентной «зеленой» цепочке поставок с учетом государственной политики. В этой статье предлагается модель, в которой производитель производит и экологически чистые, и не зеленые товары отдельно через розничного торговца. Используя централизованную и децентрализованную

модели, анализируются два случая: с государственным вмешательством и без него. В данном исследовании основное внимание уделяется изучению стратегии ценообразования для максимизации общей прибыльности производства. Численные расчеты и анализ чувствительности отражают ценные результаты по оптимальному выбору с вмешательством и без вмешательства государства при производстве экологически чистых товаров.

Авторы работы [11] исследовали модель инвентаризации растущих продуктов в птицеводстве на интенсивность выбросов углерода, участвующих в образовании парниковых газов. Исследование проведено с целью определения оптимального периода размножения и оптимального поголовья птицы. Численный пример и иллюстрации подтверждают аналитические результаты. Автор статьи [12] предложил структурную математическую модель системы цепочки поставок. В этой статье исследовались две ситуации в двух моделях. В первой анализировались функции прибыли производителя и розничного торговца на основе вычислительного метода, во второй - ценовая конкуренция двух альтернативных продуктов, где спрос конечного потребителя зависит от цены и качества экологически чистого продукта. В этой модели функции прибыли двух компаний сформулированы отдельно с учетом доходов от продаж и затрат связанных с экологической и социальной ответственностью. Основная цель данной статьи – найти оптимальную цену и качество зелени для максимизации функции прибыли.

Коллектив ученых на основе анализа своих прошлых исследований в работе [13] сформировал новую сеть замкнутой цепочки поставок для орехового производства как части сельскохозяйственных культур. Для предлагаемой сети была разработана модель смешанно-целочисленного линейного программирования с целью минимизации общих затрат для орехового производства. Модель учитывала спрос на различных рынках и подготовку возвращаемой продукции. Для решения проблемы использовались подходы оптимизации, сочетающие в себе класси-

ческие и эвристические методы (далее, гибридные методы). Авторы исследования [14] спроектировали и рассмотрели замкнутую сеть цепочки поставок в промышленности сахарного тростника с использованием гибридных методов, что помогает снизить общую стоимость производства. Применялись три наиболее эффективные гибридные алгоритма: 1) H-GASA - комбинация генетического алгоритма с имитацией отжига, 2) H-KASA - комбинация алгоритма Кештеля с имитацией отжига, 3) H-RDASA - комбинация алгоритма благородного оленя с имитацией отжига. Результаты показали, что H-KASA лучше справляется с задачами небольшой размерности.

## 2. Цели и задачи исследования

Рассмотрим процессы функционирования предприятия. Наиболее важными для лесопромышленного производства являются: формирование цепочек поставок сырья и объемы производства [21, 22].

Для определенности необходимо отметить источники поступления сырья на биржу. Биржа заключает договоры с арендаторами делян из регионов о пользовании биржевой площадкой для торгов. После совершения сделки между предприятием по переработке сырья (лесопромышленным комплексом – заказчиком) и делянкой (продавцом), заявленный в договоре<sup>1</sup> объем сырья отправляется заказчику. Выкупить лот на бирже можно лишь целиком [21, 22].

Как правило, предприятия получают заявки от заказчиков заблаговременно. В связи с этим представляется возможным сделать предположение о том, что в управлении своей деятельностью предприятие может применять удаленные горизонты планирования. Здесь следует отметить, что спрос на товары лесопромышленной отрасли имеет сезонный характер, что усложняет планирование деятельности компании [21, 22].

Цель настоящего исследования заключается в разработке математической модели, которая позволяет формировать цепочки поставок сырья с товарно-сырьевая биржи в условиях неопределенности предложения и внешних факторов, и

<sup>1</sup> В договоре купли-продажи указываются способы и цена доставки древесины. Доставка может осуществляться силами предприятия, однако далее мы будем рассматривать доставку сырья силами поставщика

отличающуюся решением совокупного комплекса проблем: во-первых, наличием процесса принятия решения, который осуществляется в каждый отдельный день (подобно тому, как это происходит в реальной жизни), во-вторых, позволяющий учитывать технологию раскroя поступающего круглого сырья для дальнейшей переработки и производства, и, в-третьих, учетом вероятного времени доставки до склада.

Задачи исследования:

1. Построение экономико-математической модели.
2. Составление алгоритма поиска решения для модели из п.1.
3. Анализ результатов тестирования модели.

Сформулируем гипотезу исследования. Известно, что такую задачу можно решить оптимально, когда уже известны все величины, которые были разыграны (лоты, время в пути). Однако нет понимания, а можно ли принимать решения каждый день по формированию цепочек поставок сырья и об объемах производства так, чтобы значение прибыли было максимальным близко к оптимальному. Выдвинем предположение, что такая модель, которая позволяет решать задачу максимально близко к оптимальному, существует, где решения принимаются каждый день, имея лишь данные текущего дня и множество предположений о том, какая ситуация будет завтра [21, 22].

### 3. Математическая модель

Любая математическая модель описывается совокупностью параметров и переменных.

Параметры:

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

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

$Len_n$  – длина бревна n;

$len_n$  – требуемая длина №n для раскroя бревна;

$len_a$  – требуемая длина №a бруса;

$\bar{d}$  – максимальное рассматриваемое значение диаметра бревна для раскroя;

$\underline{d}$  – минимальное рассматриваемое значение диаметра бревна для раскroя;

$N$  – количество рассматриваемых длин бревен;

$N_m^*$  – множество бревен, доступных в день m;

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

$R$  – количество регионов-источников сырья на бирже;

$p_{n^*(m)}^{(2)}(Len_{n^*})$  – функция цены на реализацию бревна длиною  $Len_{n^*}$  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  $n^*(m) \in \{N_{irm}\}_{i,r}$ ,  $i = 0:I(m, r)$ ,  $r = 1:R$ .

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

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

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

$$Len_n^+ = \left\{ \bigcup_{Len_{n_1} - len_n \geq 0} \left( \{Len_{n_1} - len_n\}_{n_1} \right) \mid n_1 \in N_m^* \right\} \quad (5)$$

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

где,  $i = 0:I(m, r)$ ,  $r = 1:R$ .

Поясним ряд обозначений:  $Lot_{irm}$  – лот с номером  $i$  из региона  $r$  появившийся на бирже в день  $m$ ;  $N_{irm}$  – количество бревен в лоте;  $D_n$  – диаметр бревна  $n$ ;  $c_{imr}$  – цена лота;  $n^+(m)$  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 длиною  $Len_n$  для раскюя 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 раскюя соответственно.

Замечание 1:  $\sum_n (N_{nirm}^- + N_{nirm}^+) = N_{irm}$ .

Замечание 2:  $\sum_{n,i,r} (N_{nirm}^- + N_{nirm}^+) = |N_m^*|$ .

$A_{aen}^{(1)}(len_n, len_a)$  – карта раскюя бревна типа  $n$  (с длиною  $len_n$ ) на брусья длиною  $len_a$  ( $e$  – номер варианты раскюя);

$A_{aj}^{(2)}$  – норма выкроек заготовок типа  $j$  при раскюе бруса длиною  $Len_a$ ;

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

$B_0$  – начальный бюджет;

$FC$  – постоянные издержки;

$M$  – горизонт планирования;

$T_{r\tilde{m}}$  – 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  $right$  – минимальное и максимальное значение случайной величины, распределенной по равномерному закону;

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

$\bar{b}$  – вместимость склада.

$N^{(j)}$  – константа;

$\tilde{T}$  – количество дней наперед, в течение которых предприятие планирует свою деятельность;

$\pi_m$  – объем прибыли в день  $m$ .

Переменные:

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

$\lambda_{irm}$  – решение о покупке лота  $i$  из региона  $r$ , появившееся на бирже в день  $m$ ;

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

$y_{enm}$  – количество раскроенных бревен длиною в  $Len_n$  типом раскюя  $e$  в день  $m$ ;

$z_{ajm}$  – количество раскраиваемых брусков длиною  $Len_a$  методом  $j$  в день  $m$ ;

$\varepsilon_m^{(j)}$  – штрафная переменная.

Задача  $F_m^{(2,2)}$  примет вид:

$$\sum_{t=1}^{\min(\tilde{T}, M-m+1)} \left( p_{k(m+t-1)}^{(1)} x_{k(m+t-1)} - \sum_{i,r} \tilde{c}_{ir(m+t-1)} \lambda_{ir(m+t-1)} - \sum_{j=1}^2 N^{(j)} \varepsilon_{m+t-1}^{(j)} \right) \rightarrow \max \quad (7)$$

$$\sum_{e,n} A_{aen}^{(1)} y_{en(m+t-1)} = \sum_j z_{aj(m+t-1)} \quad (8)$$

$$\sum_e y_{en(m+t-1)} = \sum_{i,r} N_{nir\tilde{m}}^+ \lambda_{ir\tilde{m}} \quad (9)$$

$$\lambda_{ir\tilde{m}} = \begin{cases} const, \tilde{m} \leq m \\ \{0; 1\}, \begin{cases} \tilde{m} = m \\ \tilde{T}_{r\tilde{m}} = t-1 \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

где  $\tilde{m} + \tilde{T}_{r\tilde{m}} = m + t - 1$ ,  $t = 1: \min(\tilde{T}, M - m + 1)$ .

$$b_{j(m+t-1)} = b_{j(m+t-2)} - \sum_k A_{jk}^{(3)} x_{k(m+t-1)} + \sum_a A_{aj}^{(2)} (len_a) z_{aj(m+t-1)} \quad (11)$$

$$\pi_{m-1} + \sum_{\underline{t}=1}^t \left( \sum_k p_{k(m+\underline{t}-1)}^{(1)} x_{k(m+\underline{t}-1)} - \sum_{i,r} \tilde{c}_{ir(m+\underline{t}-1)} \lambda_{ir(m+\underline{t}-1)} - FC * (m + \underline{t} - 1) \right) \geq 0 \quad (12)$$

где  $\tilde{c}_{irm} = c_{irm} - \sum_{(n^* \in n^-)} p_{n^* m}^{(2)} (Len_{n^*}) N_{nirm}^-$ ,  $t = 1: \min(\tilde{T}, M - m + 1)$ ,  $\pi_0 = B_0$ .

$$\sum_j b_{j(m+t-1)} = \begin{cases} 0, & \text{если } m + t - 1 = M, t \neq 1 \\ \tilde{b}_m(\{V_{imrl}\}_{i,r}, \{c_{imrl}\}_{i,r}, m), & \text{если } t = 1 \\ \min(\bar{b}, \prod_{\underline{t}=1}^t \tau(m + \underline{t}) * \tilde{b}_m(\{V_{imrl}\}_{i,r}, \{c_{imrl}\}_{i,r}, m)), & m + t - 1 < M, t \neq 1 \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{где } \tilde{b}_m = \tilde{b}_m(\{V_{irm}\}_{i,r}, \{c_{irm}\}_{i,r}, m), \tau(m) = \begin{cases} \frac{\sum_{e=1}^E b_{jm}^{(e)}}{\sum_{e=1}^E b_{j(m-1)}^{(e)}}, & m < M \\ 0, & m = M \end{cases}$$

$$b_{j(m+t-1)} + \sum_{j=1}^2 (-1)^j \varepsilon_{m+t-1}^{(j)} \geq 0 \quad (14)$$

$$\check{T}_{r\tilde{m}} = m^* : \begin{cases} \left| L_r - \sum_{\underline{m}=\tilde{m}}^{m^*} S_{\underline{m}} \right| \rightarrow \min \\ L_r - \sum_{\underline{m}=\tilde{m}}^{m^*} S_{\underline{m}} \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$S_m \sim LN(\check{a}_m, \check{\delta}_m) \quad (16)$$

$$0 \leq x_{km} \leq H_{km} \quad (17)$$

$$y_{enm}, z_{ajm} \in Z^+ \quad (18)$$

$$b_{j(m+t-1)}, \varepsilon_{m+t-1}^{(j)} \geq 0 \quad (19)$$

$$b_{jm} = \text{const.} \quad (20)$$

Проведем следующие подсчеты:

$$\pi_m = \pi_{m-1} + \sum_k p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r} c_{imrl} \lambda_{imrl} - FC \quad (21)$$

$$b_{lm} = b_{lm-1} - \sum_k A_{lk} x_{km} + \gamma_{\tilde{m}m} (\sum_{i,r} V_{i\tilde{m}rl} \lambda_{i\tilde{m}rl}), \quad (22)$$

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

$$T_{r\tilde{m}} = m^* : \begin{cases} \left| L_r - \sum_{\underline{m}=\tilde{m}}^{m^*} S_{\underline{m}} \right| \rightarrow \min \\ L_r - \sum_{\underline{m}=\tilde{m}}^{m^*} S_{\underline{m}} \leq 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$S_m \sim LN(a_m, \delta_m). \quad (24)$$

Перейдем на следующий день:

$$m = m + 1. \quad (25)$$

В выражении (25) знак равенства используется в качестве оператора присваивания значению слева от знака равно значению справа.

Рассмотрим выражения (7–24) 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)  $\sum \left( \sum_{n^* \in n^-} p_{n^* m}^{(2)} (Len_{n^*}) N_{nirm}^- \right) \lambda_{irm}$ . Тут же в целевой функции присутствует вычитаемое  $\sum_{j=1}^2 N^{(j)} \varepsilon_{m+t-1}^{(j)}$ , которое в совокупности со следующими ограничениями и выражениями заставляет находить решения, близкие к оптимальному.

Равенство (8) утверждает, что все раскроенные брусья в день  $t$  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.

(10) отражает периоды, когда  $\lambda_{irm}$  - переменная, а когда - параметр.

(11) задает рекуррентное соотношение запасов раскроенного материала на складе.

Ограничение (12) призвано, чтобы предприятие соблюдало бюджетное правило.

Правило расчета планируемых запасов сырья на  $t - 1$  дней вперед отражено в (13) и рассчитывается из гипотезы о том, что статистические выходные данные по сделкам на бирже незначительно меняются с каждым годом. Затем, алгоритм поиска оптимального решения должен найти такое распределение переменных, которое бы удовлетворяло расчетам прогнозного объема раскроенного сырья на складе (целевая функция гарантирует стремление к этому значению).

(14) гарантирует, что на складе не будет отрицательного запаса сырья.

Правила (15–16) отражают предположение, в соответствии с которым рассчитывается время товаров в пути.

Выражения (17–20) отражают характер переменных.

Выражения (21–24) составляют картину того, как все получилось на практике.

Для тестирования модели взяты данные из источников, указанных в работе [37].

## 4. Обсуждение

Рассмотрим результаты работы модели (Рис. 1–4). Обозначим  $opt(e)$  оптимальную траекторию прибыли для итерации  $e$ . Можно с уверенностью утверждать, что периоды планирования были достаточно сложными, с точки зрения управлеченческих решений, так как даже при оптимальном управлении не удается нарастить прибыль. Однако результаты работы разработанной модели показывают ее эффективность даже в такой сложившейся ситуации.

Исходя из Рис. 2 видно, что закупка сырья происходила на всем горизонте планирования. Второй ресурс используется больше, поэтому его уровень обычно выше, чем у первого. Отставание от оптимальной траектории прибыли связано с несколькими факторами:

1. Другие объемы производства;
2. Отличные от оптимальных закупки сырья.

На Рис. 3 отчетливо можно заметить, что объем производства не постоянен, и за счет того,

что уже в самом начале горизонта планирования объемы производства ниже предельных, этим объясняется резкое начальное отставание от оптимальной траектории прибыли.

## Заключение

Разработанная модель позволяет находить субоптимальное решение задачи лесоперерабатывающего предприятия об объемах производства каждый день и о формировании устойчивых цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях неопределенности. Отличительной чертой этой модели является ее возможность учитывать технологическую особенность производства – технологию раскюра поступающего с биржи сырья, а также дает возможность принимать решение каждый день менеджментом предприятия. Результаты тестирования модели показали, что даже при сложной с управлеченческой точки зрения ситуации, когда при оптимальном управлении прибыль падает, полученное решение не значительно хуже оптимального.

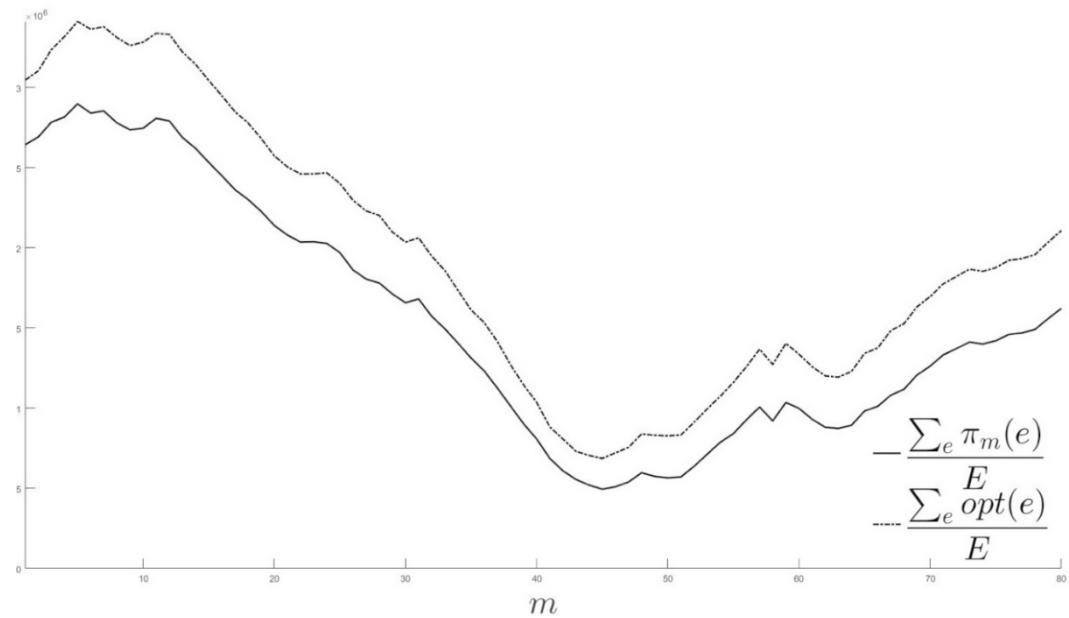
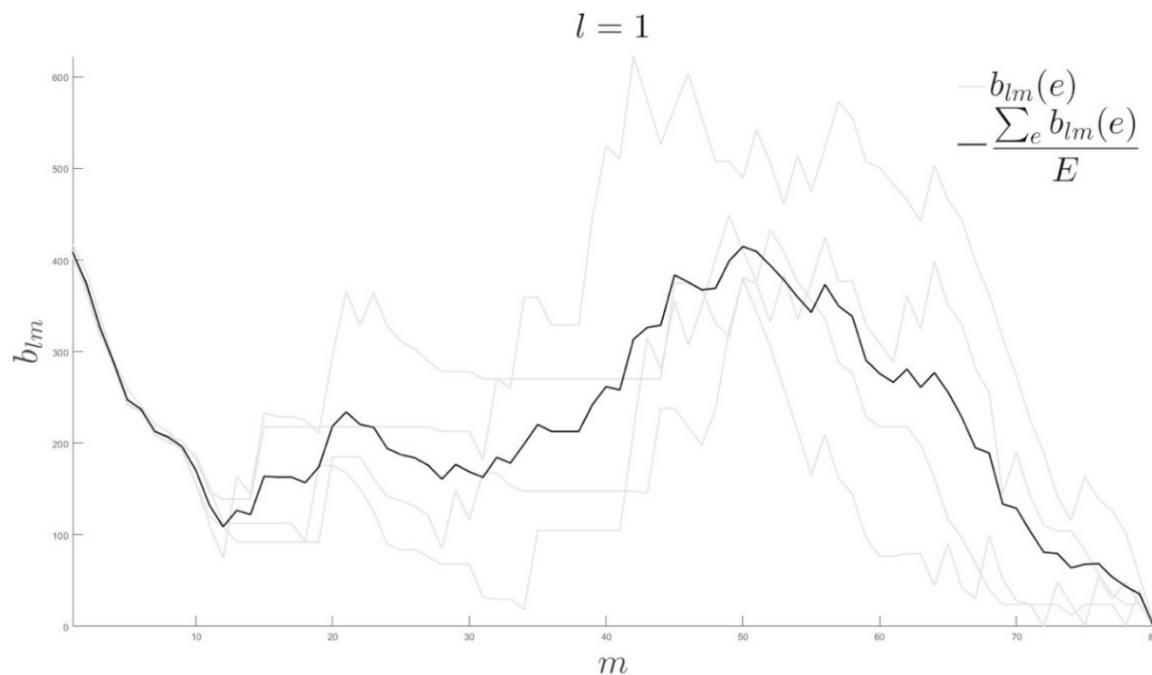


Рис.1. Визуализация средних значений оптимальных и полученных значений прибыли

Рис. 2. Визуализация траектории запасов сырья типа  $l = 1$  на складе

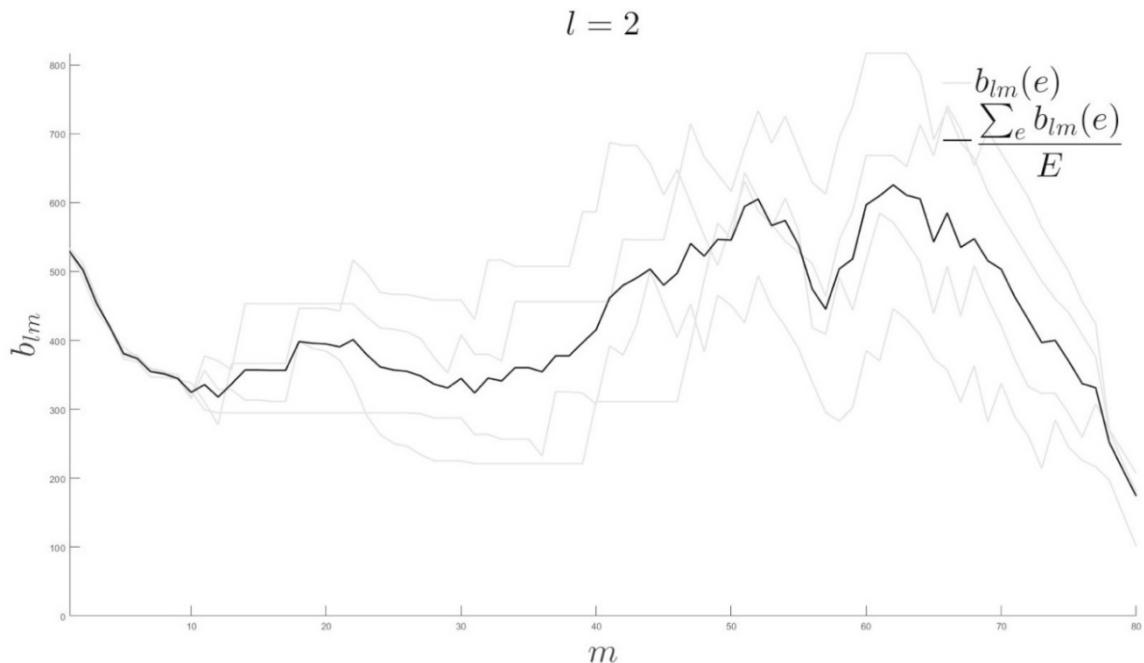
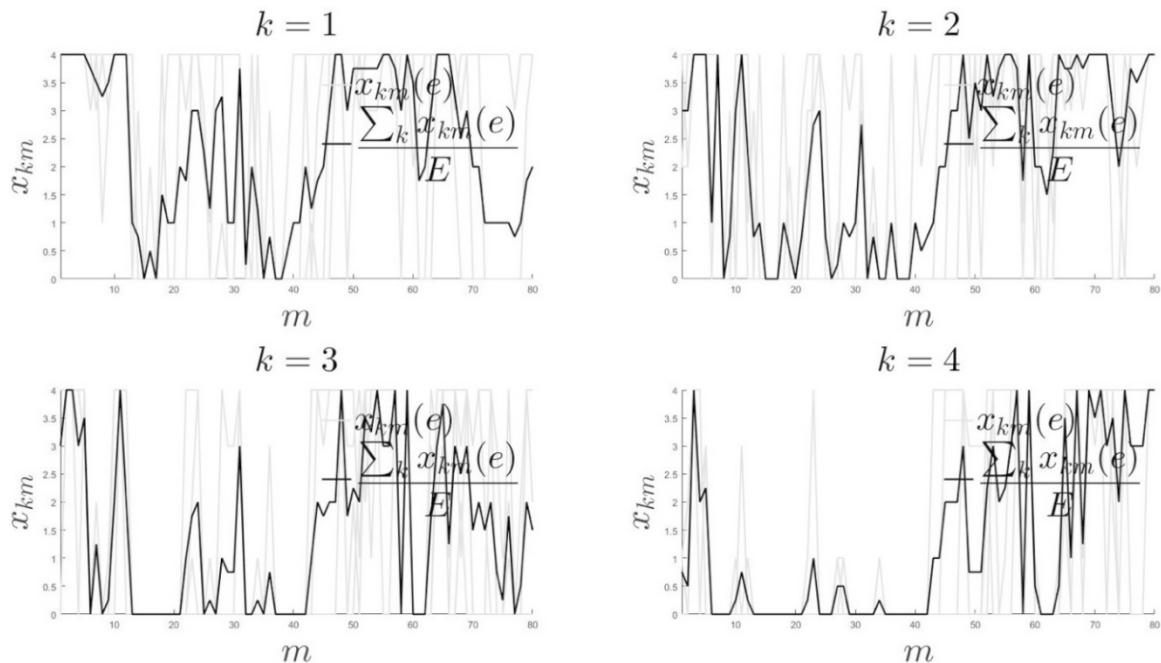
Рис. 3. Визуализация траектории запасов сырья типа  $l = 2$  на складе

Рис. 4. Визуализация объемов производства товаров

## Литература

- Abdollah B., Ghasemi P., Chobar A. P., Sasouli M. R., Lahevardi M. A New Wooden Supply Chain Model for Inventory Management Considering Environmental Pollution: A Genetic algorithm. *Foundations of Computing and Decision Sciences*. 2022;47:83-408. doi:10.2478/fcds-2022-0021
- Salehi-Amiri A., Akbapour N., Hajiaghaei-Keshteli M., Gajpal Y., Jabbarzadeh A. Designing an effective two-stage, sustainable, and IoT based waste management system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;157. doi: 112031.10.1016/j.rser.2021.112031
- Salehi-Amiri A., Zahedi A., Gholian-Jouybari F., Calvo E. Z. R., Hajiaghaei-Keshteli M. Designing a closed-loop supply chain network considering social factors; a case study on avocado industry. *Applied Mathematical Modelling*. 2022;101:600-631. doi: 10.1016/j.apm.2021.08.035
- Daneshdoost F., Hajiaghaei-Keshteli M., Sahin R., Niroomand S. Tabu Search Based Hybrid Meta-Heuristic Approaches for Schedule-Based Production Cost Minimization Problem for the Case of Cable Manufacturing Systems. *Informatica*. 2022;1-24. doi: 10.15388/21-INFOR471
- Chouhan V. K., Khan S. H., Hajiaghaei-Keshteli M. Sustainable planning and decision-making model for sugarcane mills considering environmental issues. *Journal of environmental management*. 2022; 303. doi: 114252.10.1016/j.jenvman.2021.114252
- Mondal A., Roy S.K. Multi-objective sustainable opened-and closed-loop supply chain under mixed uncertainty during COVID-19 pandemic situation. *Computers & Industrial Engineering*. 2021;159. doi: 107453.10.1016/j.cie.2021.107453
- Mondal A., Roy S. K., Midya S. Intuitionistic fuzzy sustainable multi-objective multi-item multi-choice step fixed-charge solid transportation problem // *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2021;1-25. doi: 10.1007/s12652-021-03554-6
- Midya S., Kumar Roy S., Wilhelm Weber G. Fuzzy multiple objective fractional optimization in rough approximation and its aptness to the fixed-charge transportation problem. *RAIRO--Operations Research*. 2021;55(3). doi: 10.1051/ro/2021078
- Taleizadeh A. A., Shahriari M., Sana S.S. Pricing and Coordination Strategies in a Dual Channel Supply Chain with Green Production under Cap and Trade Regulation. *Sustainability*. 2021;13. Article ID: 12232. doi: 10.3390/su132112232
- Barman A., Das R., De P. K., Sana S.S. Optimal pricing and greening strategy in a competitive green supply chain: Impact of government subsidy and tax policy. *Sustainability*. 2021;13. Article ID: 9178.
- Rana K., Singh S. R., Saxena N., Sana S.S. Growing items inventory model for carbon emission under the permissible delay in payment with partially backlogging. *Green Finance*. 2021;3:153-174. doi: 10.3934/GF.2021009
- Sana S.S. A structural mathematical model on two echelon supply chain system. *Annals of Operations Research*. 2021; 1-29.
- Salehi-Amiri A., Zahedi A., Akbapour N., Hajiaghaei-Keshteli M. Designing a sustainable closed-loop supply chain network for walnut industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;141. Article ID: 110821. doi: 10.1016/j.rser.2021.110821
- Chouhan V. K., Khan S. H., Hajiaghaei-Keshteli M. Metaheuristic approaches to design and address multi-echelon sugarcane closed-loop supply chain network. *Soft Computing*. 2021;25:11377-11404. doi: 10.1007/s00500-021-05943-7
- Mosallanezhad B., Hajiaghaei-Keshteli M., Triki C. Shrimp closed-loop supply chain design. *Soft Computing*. 2021;11:7399-7422. doi: 10.1007/s00500-021-05698-1
- Hamdi-Asl A., Amoozad-Khalili H., Tavakkoli-Moghaddam R., Hajiaghaei-Keshteli M. Toward sustainability in designing agricultural supply chain network: A case study on palm date. *Scientia Iranica*. 2021. doi: 10.24200/sci.2021.58302.5659
- Fasihi M., Tavakkoli-Moghaddam R., Najafi S. E., Hajiaghaei M. Optimizing a bi-objective multi-period fish closed-loop supply chain network design by three multi-objective meta-heuristic algorithms. *Scientia Iranica*. 2021. doi: 10.24200/sci.2021.57930.5477
- Mosallanezhad B., Chouhan V. K., Paydar M. M., Hajiaghaei-Keshteli M. Disaster relief supply chain design for personal protection equipment during the COVID-19 pandemic. *Applied Soft Computing*. 2021;112. doi: 107809.10.1016/j.asoc.2021.107809
- Mousavi R., Salehi-Amiri A., Zahedi A., Hajiaghaei-Keshteli M. Designing a supply chain network for blood decomposition by utilizing social and environmental factor. *Computers & Industrial Engineering*. 2021;160. doi: 107501.10.1016/j.cie.2021.107501
- Zahedi A., Salehi-Amiri A., Hajiaghaei-Keshteli M., Diabat A. Designing a closed-loop supply chain network considering multi-task sales agencies and multi-mode transportation. *Soft Computing*. 2021;8:6203-6235. doi: 10.1007/s00500-021-05607-6
- Рогулин Р.С. Математическая модель формирования цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях неопределенности. *Бизнес-информатика*. 2023. Т. 17. №4. С. 41-56. doi: 10.17323/2587-814X.2023.4.41.56
- Рогулин Р.С. Модель формирования лесопромышленных цепочек поставок сырья на склад с учетом особенностей. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2023. №4. С. 121-132.

**Рогулин Родион Сергеевич.** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владивостокский государственный университет», Владивосток, Россия. Кандидат экономических наук, доцент кафедры «Математика и моделирование» Область научных интересов: математическое моделирование, теория и методы оптимизации, моделирование цепочек поставок. E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

## SCM in a Timber Processing Manufacturing with Risk-Based Cutting Technology

R. S. Rogulin

Vladivostok State University, Vladivostok, Russia

**Abstract.** The formation of raw material supply chains is closely related to production problems at a timber processing enterprise. This article examines a forestry enterprise without its own sources of raw materials - allotments, which sets itself the goal every day of solving the problem of forming supply chains for raw materials from the exchange and the optimal loading of production workshops. A commodity exchange is considered as a source of raw materials, where lots appear every day in different regions in a random order. The paper considers a mathematical model, which represents a mechanism for making decisions on each individual day over the entire planning horizon and is distinguished by the fact that it allows taking into account cutting technology, lot travel time under conditions of uncertainty. An additional difference is that the search for a solution is based on the calculated optimal trajectories of raw material inventories in the warehouse for similar previous planning periods. The model was tested on data from the Russian Commodity and Raw Materials Exchange and one of the Primorsky Territory enterprises. Analysis of the solutions obtained showed that even with a rather complex scenario for the development of events, the model shows qualitatively high results.

**Keywords:** supply chain management, production volumes, timber processing enterprises, approximate solution, mathematical model, commodity exchange, lot transit time.

DOI 10.14357/20718632240310      EDN QMGNDY

## References

1. Abdollah B., Ghasemi P., Chobar A. P., Sasouli M. R., La-jevardi M. A New Wooden Supply Chain Model for Inventory Management Considering Environmental Pollution: A Genetic algorithm. *Foundations of Computing and Decision Sciences*. 2022;47:83-408. doi:10.2478/fcds-2022-0021
2. Salehi-Amiri A., Akbapour N., Hajiaghaei-Keshteli M., Gajpal Y., Jabbarzadeh A. Designing an effective two-stage, sustainable, and IoT based waste management system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;157. doi: 112031.10.1016/j.rser.2021.112031
3. Salehi-Amiri A., Zahedi A., Gholian-Jouybari F., Calvo E. Z. R., Hajiaghaei-Keshteli M. Designing a closed-loop supply chain network considering social factors; a case study on avocado industry. *Applied Mathematical Modelling*. 2022;101:600-631. doi: 10.1016/j.apm.2021.08.035
4. Daneshdoost F., Hajiaghaei-Keshteli M., Sahin R., Ni- roomand S. Tabu Search Based Hybrid Meta-Heuristic Approaches for Schedule-Based Production Cost Minimization Problem for the Case of Cable Manufacturing Systems. *Informatica*. 2022;1-24. doi: 10.15388/21-INFOR471
5. Chouhan V. K., Khan S. H., Hajiaghaei-Keshteli M. Sustainable planning and decision-making model for sugarcane mills considering environmental issues. *Journal of environmental management*. 2022; 303. doi: 114252.10.1016/j.jen- vman.2021.114252
6. Mondal A., Roy S.K. Multi-objective sustainable opened-and closed-loop supply chain under mixed uncertainty during COVID-19 pandemic situation. *Computers & Industrial Engineering*. 2021;159. doi: 107453.10.1016/j.cie.2021.107453
7. Mondal A., Roy S. K., Midya S. Intuitionistic fuzzy sustainable multi-objective multi-item multi-choice step fixed-charge solid transportation problem // *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2021;1-25. doi: 10.1007/s12652-021-03554-6
8. Midya S., Kumar Roy S., Wilhelm Weber G. Fuzzy multiple objective fractional optimization in rough approximation and its aptness to the fixed-charge transportation problem. *RAIRO--Operations Research*. 2021;55(3). doi: 10.1051/ro/2021078
9. Taleizadeh A. A., Shahriari M., Sana S.S. Pricing and Co-ordination Strategies in a Dual Channel Supply Chain with Green Production under Cap and Trade Regulation. *Sustainability*. 2021;13. Article ID: 12232. doi: 10.3390/su132112232
10. Barman A., Das R., De P. K., Sana S.S. Optimal pricing and greening strategy in a competitive green supply chain: Impact of government subsidy and tax policy. *Sustainability*. 2021;13. Article ID: 9178.
11. Rana K., Singh S. R., Saxena N., Sana S.S. Growing items inventory model for carbon emission under the permissible delay in payment with partially backlogging. *Green Finance*. 2021;3:153-174. doi: 10.3934/GF.2021009

12. Sana S.S. A structural mathematical model on two echelon supply chain system. *Annals of Operations Research*. 2021; 1-29.
13. Salehi-Amiri A., Zahedi A., Akbapour N., Hajiaghaei-Keshteli M. Designing a sustainable closed-loop supply chain network for walnut industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;141. Article ID: 110821. doi: 10.1016/j.rser.2021.110821
14. Chouhan V. K., Khan S. H., Hajiaghaei-Keshteli M. Metaheuristic approaches to design and address multi-echelon sugarcane closed-loop supply chain network. *Soft Computing*. 2021;25:11377-11404. doi: 10.1007/s00500-021-05943-7
15. Mosallanezhad B., Hajiaghaei-Keshteli M., Triki C. Shrimp closed-loop supply chain network design. *Soft Computing*. 2021;11:7399-7422. doi: 10.1007/s00500-021-05698-1
16. Hamdi-Asl A., Amoozad-Khalili H., Tavakkoli-Moghaddam R., Hajiaghaei-Keshteli M. Toward sustainability in designing agricultural supply chain network: A case study on palm date. *Scientia Iranica*. 2021. doi: 10.24200/sci.2021.58302.5659
17. Fasihi M., Tavakkoli-Moghaddam R., Najafi S. E., Hajiaghaei M. Optimizing a bi-objective multi-period fish closed-loop supply chain network design by three multi-objective meta-heuristic algorithms. *Scientia Iranica*. 2021. doi: 10.24200/sci.2021.57930.5477
18. Mosallanezhad B., Chouhan V. K., Paydar M. M., Hajiaghaei-Keshteli M. Disaster relief supply chain design for personal protection equipment during the COVID-19 pandemic. *Applied Soft Computing*. 2021;112. doi: 107809.10.1016/j.asoc.2021.107809
19. Mousavi R., Salehi-Amiri A., Zahedi A., Hajiaghaei-Keshteli M. Designing a supply chain network for blood decomposition by utilizing social and environmental factor. *Computers & Industrial Engineering*. 2021;160. doi: 107501.10.1016/j.cie.2021.107501
20. Zahedi A., Salehi-Amiri A., Hajiaghaei-Keshteli M., Diabat A. Designing a closed-loop supply chain network considering multi-task sales agencies and multi-mode transportation. *Soft Computing*. 2021;8:6203-6235. doi: 10.1007/s00500-021-05607-6
21. Rogulin R.S. Mathematical Model for Searching for an Optimal Solution to the Problem of Forming Supply Chains for Raw Materials of Forestry Enterprises under Conditions of Uncertainty. *Upravlenčeskie nauki*. 2023;13(4):22-33 (In Russ). doi:10.26794/2304-022X-2023-13-4-22-33
22. Rogulin R. S. Model for the Formation of Timber Industry Supply Chains of Raw Materials to the Warehouse, Taking into Account the Features. *Informacionnye tehnologii i vyčislitelnye sistemy*. 2023;4:121-132 (In Russ).

**Rogulin Rodion S.** PhD, Vladivostok State University. E-mail: rafassiaofusa@mail.ru