

Модель формирования лесопромышленных цепочек поставок сырья на склад с учетом особенностей

Р. С. Рогулин

Владивостокский государственный университет, Владивосток, Россия

Аннотация. В статье рассматривается деятельность лесопромышленного предприятия без собственных источников сырья в лице делян, которое ставит себе целью найти оптимальное решение в конце горизонта планирования, основываясь на данных об уже реализованных сделках. В качестве источника сырья рассматривается товарно-сырьевая биржа, где лоты появляются каждый день в разных регионах добытчиков в случайном порядке. В работе представлена математическая модель, позволяющая оценить оптимальную траекторию значений прибыли на всем горизонте планирования и отличающаяся тем, что позволяет учитывать долю полезного объема сырья, которое по зачислению на склад можно использовать в производстве ОСБ плит и время лота в пути в условиях неопределенностей. Модель протестирована на данных товарно-сырьевой биржи России и одного из предприятий Приморского края. Проведен анализ полученных решений.

Ключевые слова: оптимизация производства, транспортная задача, лесная промышленность, товарно-сырьевая биржа, цепочки поставок, выпуск продукции.

DOI 10.14357/20718632230411

EDN TSCCFL

Введение

Компании разрабатывают и экспериментируют с инновационными гибкими организационными и управленческими решениями на протяжении долгого времени. Сложность принятия решений на предприятиях в современных условиях быстро растет вместе с эволюцией факторов окружающей бизнес-среды. Чтобы обеспечить устойчивость цепочек поставок (Supply Chains - далее SC), теперь требуются высокое качество, конкурентоспособные цены и быстрые сроки разработки программного обеспечения, моделей и подходов. Компании, которые намереваются внедрить такого рода решения и адаптироваться к ситуации текущего времени, должны быть в курсе трендов и, как следствие,

должны внедрить стратегическую систему с использованием различных методов управления и инструментов оптимизации для анализа большого объема данных для достижения удовлетворенности клиентов. В результате внедрения результатов работ, проводимых в контексте Индустрии 4.0, могут быть улучшены решения на предприятиях до соответствующего текущему времени и их вызовам качества [1-3].

Наиболее часто в исследованиях последних лет утверждается необходимость достижения удовлетворенности клиентов с помощью включения нескольких наиболее важных внешних и/или внутренних факторов при решении задач управления цепочками поставок (Supply Chain Management - далее SCM), а именно, управление запасами (разработка, особенности и ограничения),

а в некоторых случаях и изменениями в объемах поставляемых видов ресурсов в зависимости от времени и внешних факторов [4-6].

До конца 1970-х годов в литературе преобладала организационная модель вертикально интегрированной компании. Впоследствии развитие коммуникационных и информационных технологий привело к кардинальным изменениям в логистике по мере увеличения требований отдельных клиентов. Все эти изменения способствуют финансовой интеграции бизнес-процессов, тем самым снижая затраты на переключение и предоставляя персонализированные услуги с более короткими сроками доставки. Это решающие факторы в развитии SCM. Благодаря новому методу управления компании становятся частью сети различных организаций. Цель состоит в том, чтобы предоставлять индивидуальные продукты и услуги. Поэтому понятие цепочки поставок гораздо шире, чем логистика. С этой точки зрения успех системы зависит от интерактивных возможностей отдельных узлов сети и эффективного использования интерактивных технологий. Изменчивость может быть связана с «эффектом Форрестера» или с «эффектом кнута». Он перемещается вверх по цепочке поставок и выявляет уровни запасов выше необходимого. В большинстве научных работ авторы отмечают, что эффективная цепочка поставок имеет следующие характеристики:

- Стабильные и взаимовыгодные организационные отношения [7-12];
- Надлежащая координация [13-18];
- Эффективный поток информации [19-24];
- Эффективное управление запасами (в том числе, с использованием логики подхода just-in-time) [25-30].

1. Обзор литературных источников

В научных статьях [2, 4, 6] обсуждается влияние глобализации на управление цепями поставок, используя программное обеспечение и математическое программирование для моделирования ситуаций и принятия управленческих решений. В статье [1] представлена модель геометрического программирования для дифференциации цен и планирования производства на нескольких площадках для максимизации прибыли цепочки поставок. В статье [5] авторы

моделируют цепочки поставок с использованием уравнений в частных производных и дифференциальных уравнений, фокусируясь на оптимизации стоимости. Авторы [7] исследуют аутсорсинг в управлении цепями поставок, предлагая математическую модель с использованием реальных данных для оптимального количества производства и аутсорсинга с минимальной общей стоимостью. В работе [8] разработана стохастическая математическая модель проектирования сети цепочек поставок с учетом устойчивости к внешним вызовам. Автор работы [24] разрабатывает модель для оценки перспектив сотрудничества с товарно-сырьевой биржей с учетом объемов производства и формирования цепочек поставок сырья. Работа [25] предоставляет инструмент формирования цепочек поставок и расчета объемов производства при адекватном прогнозе всех данных. Исследование [27] направлено на расчет цен на товары лесопромышленного производства с учетом формирования цепочек поставок сырья и изменения спроса в зависимости от рассчитанной цены.

В современной литературе по SCM разработаны многопериодные модели с несколькими целевыми функциями. В статье [9] предложены модели MILP и GFLP для оптимизации производства-распределения в цепочке поставок. В работе [10] разработана операционная политика для трехступенчатой цепочки с учетом характера сырья и продукции. Показано, что модель увеличивает прибыль на 15%. В статье [12] рассматривается перепроектирование цепочки с учетом финансовых критериев и сценариев спроса, используя многоцелевую модель смешанного линейного программирования. В работе [17] разработана многоцелевая модель оптимального уровня запасов и их распределения. В статье [18] предложена многопериодная модель для оптимизации решений в области сбыта продукции. Исследование [22] представляет новую бизнес-модель для управления запасами в цепочке поставок. Работа [29] посвящена минимизации стоимости цепочек поставок сырья с биржи, используя модель с двумя целевыми функциями.

В SCM существуют работы, посвященные различным проблемам управления цепями

поставок: [3] - применение анализа данных для прогнозирования сбоя в цепях поставок первого уровня с точностью 80%, [11] - анализ количественных моделей устойчивого управления цепями поставок с учетом включения анализа жизненного цикла, [13] - использование цветных сетей Петри для моделирования системы управления цепями поставок с много-агентной структурой, [14] - рассмотрение проблемы координации в устойчивой цепи поставок с экологической и социальной ответственностью, [16] - обзор применения нечетких методов для моделирования цепей поставок, [19] - разработка модели системной динамики для визуализации поведения цепи поставок при аддитивном производстве, [20] - исследование дизайна сети цепи поставок с учетом разработки новых продуктов, [21] - система оптимизации для управления цепями поставок с учетом возможных рисков, использующая модификацию генетического алгоритма и нейронную сеть.

Нельзя не отметить и вклад отечественных ученых в решение проблемы SCM. Так, советские и российские ученые разрабатывали альтернативные концепции (например, сетевые) и соответствующие им аналитические методы поиска решения [23, 30–32].

Таким образом, можно утверждать, что рассматриваемая тема в рамках проблемы управления цепочками поставок актуальна и получила серьезную разработку в литературе. Однако отметим некоторые важные особенности проведенного обзора литературы:

1. В научной литературе недостаточно освещены проблемы управления цепочками поставок лесопромышленного сырья в условиях неопределенности и рисков, а именно с бирж. В основном сырьевые сделки сейчас происходят в формате B2B между делянами (продавец) и предприятием-переработчиком (покупатель) напрямую. Однако предприятия лесной отрасли, в частности, в России до сих пор работают «в черную» и уходят от налогов. Зачастую на налаживание таких связей между покупателем и продавцом уходят годы, что сужает потенциальное количество клиентов и сказывается на финальных ценах на сырье, а также страдает национальный бюджет, который недополучает налоговых отчислений. Использование инструментов бирж обеспечит

прозрачность совершенных сделок с одной стороны, а с другой - приведет к увеличению числа возможных клиентов у продавца, так как предприятиям даже иностранным, нуждающимся в сырье, не придется напрямую налаживать связи с продавцом, что положительно отразится на ценах: они станут более конкурентными и, как следствие, это приведет к более эффективной реализации сырья.

2. В основном в научной литературе рассматриваются работы, которые посвящены либо вопросам управления цепочек поставок (разработка математических моделей, которые позволяют эффективно формировать SC, принимая во внимание специфику отрасли), либо проблемам менеджмента, то есть решается та же задача SCM, но с позиций организации производства и/или формирования SC (широко известны базовые подходы, например, lean logistics, six sigma и другие). Несмотря на всю степень серьезности проработки темы управления цепочками поставок стоит отметить, что слабо освещена проблема оценки объема максимально возможной прибыли на всем горизонте планирования в условиях неопределенности и с учетом особенностей лесопромышленной отрасли. Эта задача полезна для того, чтобы иметь возможность оценить эффективность суммарной работы, с одной стороны - разработанного IT решения, с другой - качество менеджмента организации.

3. Основным отличием сырья лесопромышленной отрасли является изменение рабочего объема древесины, который уменьшается по мере его транспортировки до покупателя. Эта особенность получила незначительную разработку в научной литературе и требует учета при формировании производственного плана и цепочек поставок сырья до склада предприятия.

2. Цель и задачи исследования

Рассмотрим деятельность предприятий лесопромышленной отрасли. В текущей задаче задействованы два процесса производства: доставка и объемы приобретения сырья с биржи, а также объемы производства каждого типа продукта, исходя из имеющихся запасов сырья.

Для определенности необходимо отметить источники поступления сырья на биржу. Биржа

заключает договора с арендаторами делан из регионов, предоставляя им площадку для торгов. После совершения сделки между предприятием (далее, заказчик) по переработке сырья и деланной (продавцом) заявленный в договоре¹ объем сырья отправляется заказчику [25].

Как правило, предприятия получают заявки от заказчиков на товары заблаговременно. В связи с этим выдвинем предположение о том, что предприятие может проводить планирование своей деятельности на большие горизонты планирования. Здесь стоит отметить, что спрос на товары лесопромышленной отрасли имеют сезонный характер, что усложняет планирование деятельности компании [25].

Цель работы заключается в построении математической модели, которая позволяет осуществлять поиск решения задачи лесопромышленного предприятия об оптимальном объеме выпуска товаров исходя из формируемых и поступающих цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи и отличается возможностью учитывать условия неопределенности предложения и логистики для оценки максимального значения прибыли на всем горизонте планирования.

Для достижения цели работы были сформулированы следующие *задачи исследования*:

1. Проведение обзора научной литературы по решению рассматриваемой проблемы.
2. Построение экономико-математической модели по формированию цепочек поставок сырья и о расчете оптимального объема производства товаров лесопромышленного производства с учетом уже свершившихся событий, а именно:
 - а) распределение заявок во времени;
 - б) затраченного времени на приход лотов на склад предприятия.
3. Анализ полученных результатов тестирования модели.

3. Математическая модель

Никакое производство не способно функционировать без сырьевой базы, поэтому будем пользоваться данными биржи², которые находятся в свободном доступе. На бирже каждый

день публикуются данные о том, сколько сделок (заявок) было совершено, по какой цене и какой был продан объем сырья. Кроме того, биржа оказывает услуги по доставке сырья до потребителя, что также включается в цену товара. На бирже представлены многие регионы, откуда может потенциально поступать сырье [25]. Купить лот можно только полностью [25].

Производство происходит по следующей технологии: сырье поступает на склад, далее его перемалывают в труху, затем его прессуют в плиты ОСБ. ОСБ плиты изготавливаются отдельно для каждого типа сырья. Транспортировка происходит по ЖД путям с использованием транссибирской магистрали за счет отправителя, который включает все издержки по транспортировке лота в цену.

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 g , 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 g , 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 g дойдет до склада; L_r – расстояние от склада до региона g ; 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

¹ В договоре купли-продажи прописаны способы и цена доставки древесины. Доставка может осуществляться силами предприятия, однако, мы сосредоточимся на доставке сырья силами поставщика.

² Официальный сайт «Санкт-Петербургской Международной Товарно-сырьевой Биржи» (АО «СПбМТСБ»), [Электронный адрес]: <https://spimex.com/markets/wood/trades/results/>

лота i с типом сырья l из региона r , появившаяся на бирже в день m ; b_{lm} – уровень запаса сырья типа l на складе в день m ;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

где $\tilde{m} = m - T_{r\tilde{m}}$.

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

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

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

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

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

Поясним, что в 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_{lm-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 распределение³. Коэффициент полезного объема сырья задается формулами (10–11). Положим, что $\varepsilon^{(1)}$ имеет равномерное распределение, так как нет оценок того, как изменяется во времени рабочий объем сырья. Объем производимых товаров (12) также ограничен сверху по физическим причинам.

Как следует из описания модели $F^{(1,1)}(e)$, она является задачей нелинейного и стохастического программирования. Для решения поставленной задачи необходимо рассмотреть алгоритм решения. Он примет вид:

1. Разыграть значения (8–9) и $\gamma_{\tilde{m}m}$ с учетом (11).
2. Решить задачу смешанно-целочисленного программирования (1–7, 12) для каждого набора данных e одним из известных методов.

4. Калибровка

Тестирование модели было проведено, с одной стороны, на данных предприятия⁴, расположенного в Приморском крае, с другой стороны, сгенерированы авторами.

Рассмотрим как были сгенерированы данные, связанные с распределением лотов во времени. Для этого были взяты данные с товарно-сырьевой биржи за период с 01.02.2022 на 120 дней.

³ Подробнее о причинах см. [25, 27, 29]

⁴ Официальный сайт Предприятия ООО «ДНС-Лес». Россия, Приморский край, г. Спасск-Дальний. [Электронный ресурс]: <http://dns-les.ru/>

Каждые 30 дней происходил 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 наборов данных. Остальные значения параметров логистики и производственных процессов $(\bar{b}, \underline{b}, B_0, FC, a_m, \delta_m, \beta, L_r)$ были взяты с предприятия в соответствии с их оценками.

Для определенности будем использовать $K = 4$ типов товаров, горизонт планирования длиной в $M = 100$ дней, типов сырья $L = 2$, количество регионов $R = 4$, количество лотов каждый день в диапазон $0 \leq I \leq 6$, 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 года и серединой мая 2022 года.

Основные входные данные, характеризующие предприятие, представлены в таблицах 1 и 2 в работе [27]. Для проведения вычислений воспользуемся высокоуровневым языком программирования Matlab и встроенной функцией `intlinprog`⁵ для поиска решений задач смешано-целочисленной линейной оптимизации. Эта функция использует алгоритм "метод ветвей и границ".

5. Обсуждение

Рассмотрим Рис. 1 и 2. На них отражаются факты принятия решения касательно покупки лотов для сырья типа 1. Серым отмечаются траектории покупок лотов для каждого набора данных e , черным – их среднее значение.

Наиболее частыми для приобретения сырья с биржи на всем горизонте планирования можно отнести следующие регионы: Пермский край и Московскую область. Исходя из результатов работ [24, 25, 29] следует, что обычно территориальная близость играет важную роль в принятии решения об объемах приобретаемого сырья, однако, близость КНР к Иркутской области и наличие прямой ж-д ветки⁶ сказывается на ценах на

сырье, что влечет за собой необходимость приобретения сырья в других регионах РФ, чтобы сэкономить на затратах. Кроме того, факт приобретения сырья в более отдаленных регионах сказывается на рабочем объеме сырья, который приходит на склад, и времени в пути. В работах [25, 29] демонстрируется, что в основном стоит приобретать сырье в Иркутской области, что идет в разрез с результатами текущего исследования.

Интересным фактом является то, что для второго типа сырья оптимально будет приобретать сырье на начальных этапах планирования в Иркутской области и Республике Бурятия. Это связано с тем, что сырье, купленное в других регионах, не успеет дойти до склада и предприятие вынуждено приобретать сырье по более высоким ценам.

На Рис. 3 изображены показатель прибыли $\pi_m(e)$ в каждый отдельный день. Серым цветом обозначены объемы прибыли для каждого отдельного набора данных e , черным – среднее значение.

Видно, что наиболее финансово сложный период приходится на 40–60 дней планирования – показатель прибыли *при оптимальном решении* почти стабилизируется и не изменяется, что позволяет утверждать о сложности рассматриваемого периода с точки зрения управленческого подхода.

Кроме того, начиная примерно с 70-го дня можно заметить, что прибыль начинает резко расти – это связано с тем, что модель не учитывает будущие горизонты планирования, следующие за рассматриваемым горизонтом планирования в 100 дней.

Рассмотрим положительные и отрицательные стороны полученной модели.

1. Негативные стороны:

1.1. Отсутствие данных, необходимых для прогнозирования распределения заявок на бирже во времени.

1.2. Сложность прогнозирования ситуаций на бирже из-за влияния настроений их участников.

1.3. Увеличение количества ограничений из-за линейности модели.

⁵ <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html>

⁶ Карты международных транспортных коридоров (Евразия). Express+. Электронный ресурс:

[<http://www.expresstk.ru/wp-content/uploads/2017/08/Evroaziatskie-transportnye-koridory.pdf>].

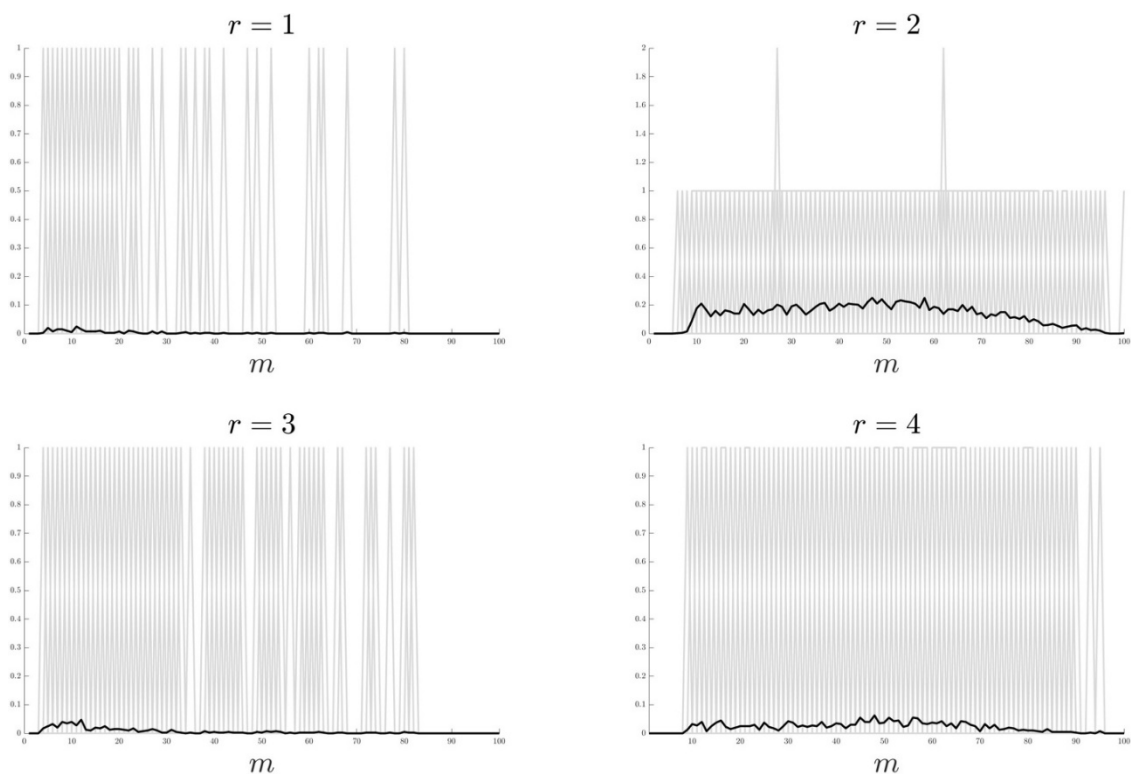


Рис. 1. Визуализация частоты приобретения лотов с каждого региона ($l = 1$)

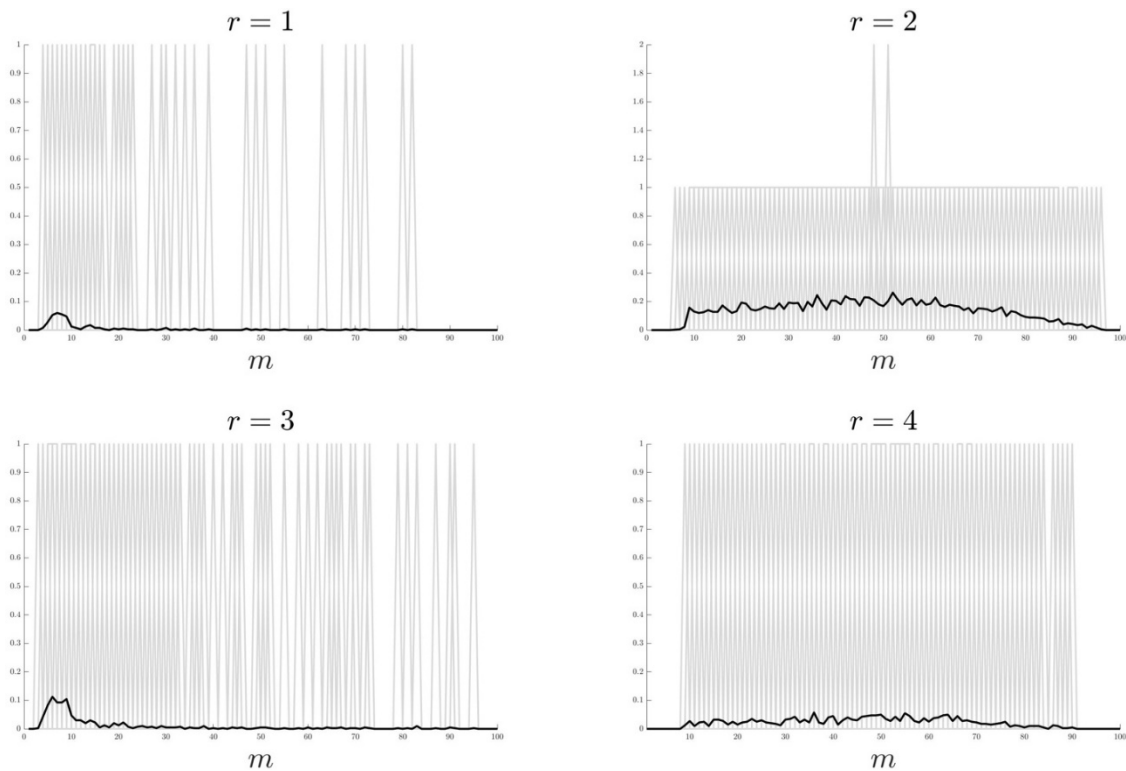


Рис. 2. Визуализация частоты приобретения лотов с каждого региона ($l = 2$)

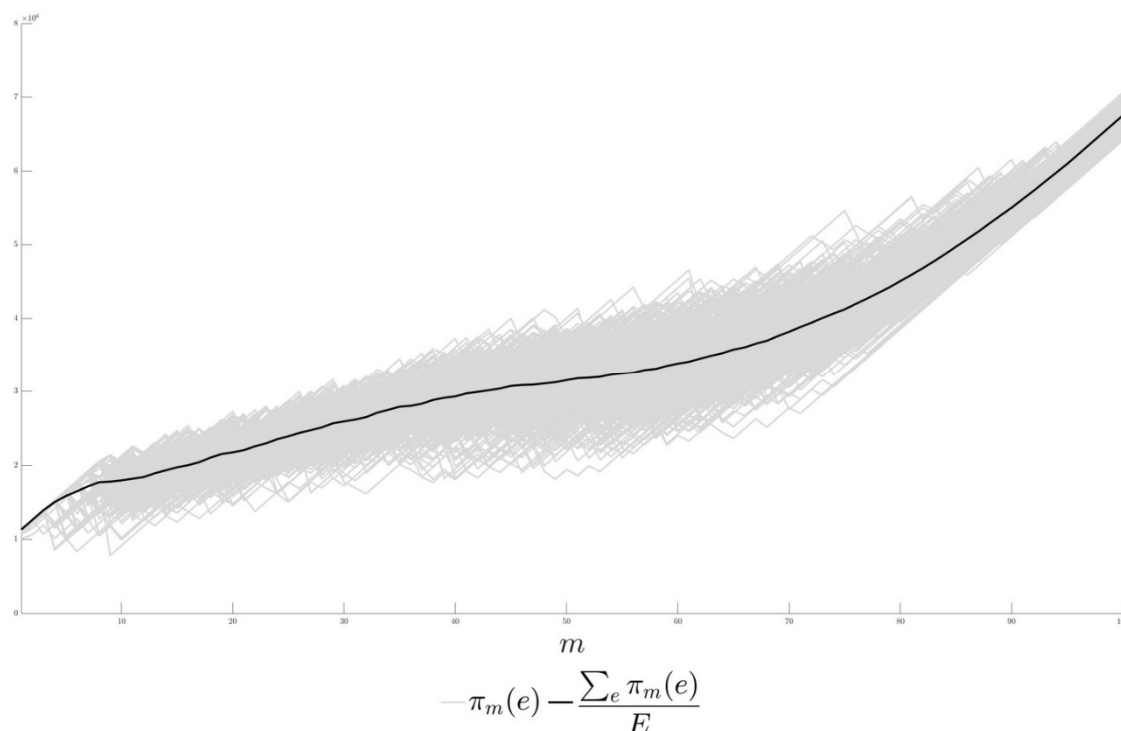


Рис. 3. Визуализация значений прибыли

1.4. Изменение параметров модели с течением времени.

1.5. Неопределенность в использовании лог-нормального распределения величины пройденного расстояния лотом.

1.6. Необходимость изменения параметра β во времени из-за влияния погодных условий и внешних факторов.

1.7. Недостаточность ограничения (12) в учете верхней оценки спроса на товары.

1.8. Отсутствие выбора степени риска при выборе стратегии формирования "сырьевого портфеля".

1.9. Невозможность моделирования использования прямых договоров B2B вместо биржевых операций для снабжения сырьем предприятий лесопромышленной отрасли.

2. Положительные стороны:

2.1. Концептуальная простота модели.

2.2. Возможность учета времени в пути лота.

2.3. Наличие коэффициента полезного объема сырья для производства.

2.4. В рамках системного подхода для лесопромышленной отрасли важно в будущих работах рассмотреть не только максимизацию прибыли для конкретного предприятия, но и

побочные социально-экономические аспекты. Например, оценка экологического ущерба, меры обеспечения устойчивого лесопользования, различные социальные особенности и другие, приведенные, в частности, в работах [23-43]. Таким образом, целесообразно более подробно рассмотреть многокритериальную поставку задачи в будущих исследованиях.

Заключение

Представлена модель для определения верхней границы прибыли на основе данных о распределении лотов, учитывающая время в пути и степень полезности лотов. Модель учитывает формирование цепочек поставок и объемы производства с учетом бюджета предприятия, и политику just-in-time, что имеет практическую ценность для топ-менеджмента лесопромышленных предприятий при оценке эффективности их деятельности.

Для уточнения верхней оценки значения прибыли имеет смысл введение дополнительных ограничений, связанных с технологиями производства, допустимости степени риска, уточнение расчетов некоторых параметров (например,

a_m, δ_m, β), влияющих на время в пути и на рабочий объем сырья по приходу на склад, нивелирование транспортных и ресурсных рисков за счет возможности приобретения сырья по прямым контрактам с делянами, введения функции спроса на конечные товары. Рассмотрены положительные и отрицательные стороны модели.

Литература

- Ghasemy, Y.R. Enhancing supply chain production-marketing planning with geometric multivariate demand function (a case study of textile industry) // *Computers & Industrial Engineering*. – 2020. – Vol. 140. Article ID 106220.
- Maina, J., Mwangangi, P.W. A Critical Review of Simulation Applications in Supply Chain Management // *Journal of Logistics Management*. – 2020. – Vol. 9. – P. 1-6.
- Brintup, A., Pak, J., Ratiney, D., Pearce, T., Wichmann, P., Woodall, P., McFarlane, D. Supply chain data analytics for predicting supplier disruptions: a case study in complex asset manufacturing // *International Journal of Production Research*. – 2020. – Vol. 58. – P. 3330-3341.
- Dominguez, R., Cannella, S. Insights on Multi-Agent Systems Applications for Supply Chain Management // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12. Article ID 1935.
- Luigi, R., Stamova, I.M., Tomasiello, S. Numerical schemes and genetic algorithms for the optimal control of a continuous model of supply chains // *Applied Mathematics and Computation*. – 2021. – Vol. 388. Article ID: 125464.
- El Raoui, H., Oudani, M., El Hilali, A. Coupling Soft Computing, Simulation and Optimization in Supply Chain Applications: Review and Taxonomy // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 31710-31732.
- Alkahtani, M. Mathematical Modelling of Inventory and Process Outsourcing for Optimization of Supply Chain Management // *Mathematics*. – 2022. – Vol 10. Article ID 1142.
- Sadeghi, Z., Boyer, O., Sharifzadeh, S., Saeidi, N. A Robust Mathematical Model for Sustainable and Resilient Supply Chain Network Design: Preparing a Supply Chain to Deal with Disruptions // *Complexity*. – 2021. – Vol. 5. – P. 1-17.
- Goodarzian, F., Shishebori, D., Nasser, H., Dadvar, F. A bi-objective production-distribution problem in a supply chain network under grey flexible conditions // *RAIRO Operations Research*. – 2021. – Vol. 55. – P. 1287-1316.
- Taghizadeh-Yazdi, M., Farrokhi, Z., Mohammadi-Balani, A. An integrated inventory model for multi-echelon supply chains with deteriorating items: a price-dependent demand approach // *Journal of Industrial and Production Engineering*. – 2021. – Vol. 37. – P. 87 - 96.
- Flores-Sigüenza, P., Marmolejo-Saucedo, J.A., Niembro-García, J., Lopez-Sanchez, V.M. A systematic literature review of quantitative models for sustainable supply chain management // *Mathematical biosciences and engineering: MBE*. – 2021. – Vol. 18. – P. 2206-2229.
- Escobar, J.W., Marin, A.A., Lince, J.D. Multi-objective mathematical model for the redesign of supply chains considering financial criteria optimization and scenarios // *International Journal of Mathematics in Operational Research*. – 2020. – Vol. 16. – P. 238-256.
- Fierro, L.H., Cano, R.E., García, J.I. Modelling of a multi-agent supply chain management system using Colored Petri Nets // *Procedia Manufacturing*. – 2020. – Vol. 42. – P. 288-295.
- Heydari, J., Rafiei, P. Integration of environmental and social responsibilities in managing supply chains: A mathematical modeling approach // *Computers & Industrial Engineering*. – 2020. – Vol. 145. Article ID 106495.
- Schroeder, M., Lodemann, S. A Systematic Investigation of the Integration of Machine Learning into Supply Chain Risk Management // *Logistics*. – 2021. – Vol. 5. Article ID 62.
- Nishanth, B., Priyanka, S., Kannan, V., Muhammad, R.B.A., Dinesh, J., Muruganandham, R., Harish, V. Mathematical modelling of supply chain under current COVID'19 business scenario with the review study on the fuzzy logic based supply chains // *European Journal of Molecular and Clinical Medicine*. – 2020. – Vol. 7. – P. 1-10.
- Saadi, E., Hafshejani, K.F., Radfar, R. Designing and Developing a multi - level supply chain mathematical model, multi products, multi objective of supplier selection considering simultaneous overall - incremental Discount // *Journal of new researches in mathematics*. – 2020. – Vol. 2. Article ID: 226097431
- Teixeira, A., Silva, E.C., Lopes, C. A mixed integer nonlinear multiperiod model for supply chain management of a company in the retail sector // *RAIRO - Operations Research*. – 2021. – Vol. 55. – P. 997-1013.
- Núñez, R.J., Andrade, S.H.H., Villarreal, A.S.M., Ortiz, A. System Dynamics Modeling in Additive Manufacturing Supply Chain Management // *Processes*. – 2021. – Vol. 9. Article ID: 982.
- Rezaei, E., Paydar, M.M., Safaei, A.S. Customer relationship management and new product development in designing a robust supply chain // *RAIRO - Operations Research*. – 2020. – Vol. 54. – P. 369-391.
- Nezamoddini, N., Gholami, A., Aqlan, F. A risk-based optimization framework for integrated supply chains using genetic algorithm and artificial neural networks // *International Journal of Production Economics*. – 2020. – Vol. 225. Article ID: 107569.
- Cesarelli, G., Scala, A.E., Vecchione, D., Ponsiglione, A., Guizzi, G. An Innovative Business Model for a Multi-echelon Supply Chain Inventory Management Pattern // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1828. Pp. 1-10.
- Уздемир А. П. Динамические целочисленные задачи оптимизации в экономике. — М.: Физматлит, 1995. — 288 с.
- Рогулин, Р.С. Моделирование перспектив взаимодействия предприятия лесопромышленного комплекса и товарно-сырьевой биржи России // *Journal of Applied Economic Research*. – 2020. – Т. 19. – № 4. – С. 489–511.
- Рогулин, Р.С. Модель оптимизации плана закупок сырья из регионов России лесоперерабатывающим комплексом // *Бизнес-информатика*. – 2020. – Т.14. – № 4. – С. 19–35.
- Рогулин, Р. С. Место ИКТ и предпринимательства в формировании устойчивых цепочек поставок // *Экономическая политика*. – 2021. – Т.16. – № 4. – С. 84–103.

27. Рогулин, Р. С. Математическая модель формирования ценовой политики и плана производственно-транспортной системы лесопромышленного предприятия // Бизнес-информатика. — 2021. — Т.15. — № 3. — С. 60–77.
28. Рогулин, Р. С. Роль информационно-коммуникационных технологий в формировании устойчивых цепочек поставок до и после пандемии covid-19 // Journal of Applied Economic Research. — 2021. — Т.20. — № 3. — С.461–488.
29. Mazelis, L., Rogulin, R. Devising a method for the formation of sustainable chains of supply of raw materials from mercantile exchange to a timber processing enterprise considering uncertainties and risks // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2021. — Vol. 5. — P. 6–18.
30. Тарасов В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. — М.: Эдиториал УРСС, 2002. — 352 с.
31. Ойхман Е. Г., Попов Э. В. Реинжиниринг бизнеса: Реинжиниринг организаций и информационные технологии. — М.: Финансы и статистика, 1997. — 336 с.
32. Ларичев О. И., Бебчук Б. Ц. Человеко-машинные процедуры решения многокритериальных задач линейного программирования с простыми иерархическими моделями // Системы и методы поддержки принятия решений. Сборник трудов / Под ред. С. В. Емельянова, О. И. Ларичева. — №12. М.: ВНИИСИ, 1986. — С. 100–108.
33. Черешкин Д. С., Ройзензон Г. В., Бритков В. Б. Применение методов искусственного интеллекта для анализа риска в социально-экономических системах // Информационное общество. — 2020. — № 3. — С. 14–24.
34. Попков Ю.С. Математическая демоэкономика. Макросистемный подход. — М.: ЛЕНАНД, 2013. — 560 с.
35. Ларичев О. И. Вербальный анализ решений. — М.: Наука, 2006. — 181 с.
36. Лившиц В. Н., Лившиц С. В. Системный анализ нестационарной экономики России (1992– 2010): рыночные реформы, кризис, инвестиционная политика. — М.: Маросейка, 2011. — 478 с.
37. Алиев Р. А., Церковный А. Э., Мамедова Г. А. Управление производством при нечеткой исходной информации. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 240 с.
38. Борисов А. Н., Крумберг О. А., Федоров И. П. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. — Рига: Зинатне, 1990. — 184 с.
39. Емельянов В.В., Ясиновский С.И. Имитационное моделирование систем: учебное пособие. Серия: Информатика в техническом университете. — М. МГТУ им. Баумана, 2009. — 584 с.
40. Ройтман Е.Я. Проблемы ценообразования на прокат тяжелых цветных металлов // Цветные металлы. — 2006. — № 6. — С. 5–7.
41. Бурков В.Н., Кацнельсон М.Б. Оперативное управление поставками металлопродукции. Решение некоторых проблем оптимизации // Автоматика и Телемеханика. — 1970. — № 1. — С. 148–158.
42. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р. Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели). — М.: Экономика, 2013. — 295 с.
43. Сохова З. Б., Редько В. Г. Моделирование поиска инвестиционных решений автономными агентами в прозрачной конкурентной экономике // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2019. — № 2. — С. 98–108.

Рогулин Родион Сергеевич. ФГБОУ ВО Владивостокский государственный университет, (ВВГУ), Владивосток, Россия. Доцент кафедры математики и моделирования, кандидат экономических наук. Область научных интересов: математическое моделирование, теория и методы оптимизации, моделирование цепочек поставок. E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

Model for the Formation of Timber Industry Supply Chains of Raw Materials to the Warehouse, Taking into Account the Features

R. S. Rogulin

Vladivostok State University, Vladivostok, Russia

Abstract. The formation of raw material supply chains is very closely related to the problems of production in a wood processing enterprise. This article discusses a timber industry enterprise without its own sources of raw materials represented by plots, which aims to find the optimal solution at the end of the planning horizon, based on data on already completed transactions. As a source of raw materials, a commodity exchange is considered, where lots appear every day in different regions of the miners in a random order. The paper presents a mathematical model that makes it possible to evaluate the optimal trajectory of profit values over the entire planning horizon and differs in that it allows taking into account the share of the useful volume of raw materials that can be used in the production of OSB boards, the lot time in transit under conditions of uncertainty. The model was tested on the data of the Commodity and Raw Materials Exchange of Russia and one of the enterprises of the Primorsky Territory. The analysis of received solutions is carried out.

Keywords: production optimization, transport task, timber industry, commodity exchange, supply chains, output.

DOI 10.14357/20718632230411

EDN TSCCFL

References

- Ghasemy, Y.R. Enhancing supply chain production-marketing planning with geometric multivariate demand function (a case study of textile industry) // *Computers & Industrial Engineering*. – 2020. – Vol. 140. Article ID 106220.
- Maina, J., Mwangangi, P.W. A Critical Review of Simulation Applications in Supply Chain Management // *Journal of Logistics Management*. – 2020. – Vol. 9. – P. 1-6.
- Brintrup, A., Pak, J., Ratiney, D., Pearce, T., Wichmann, P., Woodall, P., McFarlane, D. Supply chain data analytics for predicting supplier disruptions: a case study in complex asset manufacturing // *International Journal of Production Research*. – 2020. – Vol. 58. – P. 3330-3341.
- Dominguez, R., Cannella, S. Insights on Multi-Agent Systems Applications for Supply Chain Management // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12. Article ID 1935.
- Luigi, R., Stamova, I.M., Tomasiello, S. Numerical schemes and genetic algorithms for the optimal control of a continuous model of supply chains // *Applied Mathematics and Computation*. – 2021. – Vol. 388. Article ID: 125464.
- El Raoui, H., Oudani, M., El Hilali, A. Coupling Soft Computing, Simulation and Optimization in Supply Chain Applications: Review and Taxonomy // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 31710-31732.
- Alkahtani, M. Mathematical Modelling of Inventory and Process Outsourcing for Optimization of Supply Chain Management // *Mathematics*. – 2022. – Vol 10. Article ID 1142.
- Sadeghi, Z., Boyer, O., Sharifzadeh, S., Saeidi, N. A Robust Mathematical Model for Sustainable and Resilient Supply Chain Network Design: Preparing a Supply Chain to Deal with Disruptions // *Complexity*. – 2021. – Vol. 5. – P. 1-17.
- Goodarzian, F., Shishebori, D., Nasser, H., Dadvar, F. A bi-objective production-distribution problem in a supply chain network under grey flexible conditions // *RAIRO Operations Research*. – 2021. – Vol. 55. – P. 1287-1316.
- Taghizadeh-Yazdi, M., Farrokhi, Z., Mohammadi-Balani, A. An integrated inventory model for multi-echelon supply chains with deteriorating items: a price-dependent demand approach // *Journal of Industrial and Production Engineering*. – 2021. – Vol. 37. – P. 87 - 96.
- Flores-Sigüenza, P., Marmolejo-Saucedo, J.A., Niembro-García, J., Lopez-Sanchez, V.M. A systematic literature review of quantitative models for sustainable supply chain management // *Mathematical biosciences and engineering: MBE*. – 2021. – Vol. 18. – P. 2206-2229.
- Escobar, J.W., Marin, A.A., Lince, J.D. Multi-objective mathematical model for the redesign of supply chains considering financial criteria optimization and scenarios // *International Journal of Mathematics in Operational Research*. – 2020. – Vol. 16. – P. 238-256.
- Fierro, L.H., Cano, R.E., García, J.I. Modelling of a multi-agent supply chain management system using Colored Petri Nets // *Procedia Manufacturing*. – 2020. – Vol. 42. – P. 288-295.
- Heydari, J., Raffei, P. Integration of environmental and social responsibilities in managing supply chains: A mathematical modeling approach // *Computers & Industrial Engineering*. – 2020. – Vol. 145. Article ID 106495.
- Schroeder, M., Lodemann, S. A Systematic Investigation of the Integration of Machine Learning into Supply Chain Risk Management // *Logistics*. – 2021. – Vol. 5. Article ID 62.
- Nishanth, B., Priyanka, S., Kannan, V., Muhammad, R.B.A., Dinesh, J., Muruganandham, R., Harish, V. Mathematical modelling of supply chain under current COVID'19 business scenario with the review study on the fuzzy logic based supply chains // *European Journal of Molecular and Clinical Medicine*. – 2020. – Vol. 7. – P. 1-10.
- Saadi, E., Hafshejani, K.F., Radfar, R. Designing and Developing a multi - level supply chain mathematical model, multi products, multi objective of supplier selection considering simultaneous overall - incremental Discount // *Journal of new researches in mathematics*. – 2020. – Vol. 2. Article ID: 226097431
- Teixeira, A., Silva, E.C., Lopes, C. A mixed integer nonlinear multiperiod model for supply chain management of a company in the retail sector // *RAIRO - Operations Research*. – 2021. – Vol. 55. – P. 997-1013.
- Núñez, R.J., Andrade, S.H.H., Villarreal, A.S.M., Ortiz, A. System Dynamics Modeling in Additive Manufacturing Supply Chain Management // *Processes*. – 2021. – Vol. 9. Article ID: 982.
- Rezaei, E., Paydar, M.M., Safaei, A.S. Customer relationship management and new product development in designing a robust supply chain // *RAIRO - Operations Research*. – 2020. – Vol. 54. – P. 369-391.
- Nezamoddini, N., Gholami, A., Aqlan, F. A risk-based optimization framework for integrated supply chains using genetic algorithm and artificial neural networks // *International Journal of Production Economics*. – 2020. – Vol. 225. Article ID: 107569.
- Cesarelli, G., Scala, A.E., Vecchione, D., Ponsiglione, A., Guizzi, G. An Innovative Business Model for a Multi-echelon Supply Chain Inventory Management Pattern // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1828. Pp. 1-10.
- Uzdemir A. P. Dynamic integer problems in economics. — M.: Fizmatlit, 1995. — 288 p.
- Rogulin, R.S. Modeling the prospects for interaction between a timber industry enterprise and the commodity exchange of Russia // *Journal of Applied Economic Research*. – 2020. – Vol. 19. – P. 489-511.
- Rogulin, R.S. A model for optimizing the plan for the procurement of raw materials from the regions of Russia by a timber processing complex // *Business Informatics*. – 2020. – Vol.14. – P. 19-35.
- Rogulin, R. S. The place of ICT and entrepreneurship in the formation of sustainable supply chains // *Economic Policy*. – 2021. – Vol.16. – P. 84-103.

27. Rogulin, R. S. Mathematical model for the formation of pricing policy and plan for the production and transport system of a timber enterprise // *Business Informatics*. – 2021. – Vol.15. – P. 60–77.
28. Rogulin, R. S. The role of information and communication technologies in the formation of sustainable supply chains before and after the covid-19 pandemic // *Journal of Applied Economic Research*. – 2021. – Vol.20. – P. 461–488.
29. Mazelis, L., Rogulin, R. Devising a method for the formation of sustainable chains of supply of raw materials from mercantile exchange to a timber processing enterprise considering uncertainties and risks // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – Vol. 5. – P. 6–18.
30. Tarasov V. B. From multi-agent systems to intellectual organizations: philosophy, psychology, informatics. - M.: Editor of URSS, 2002. - 352 p.
31. Oikhman E. G., Popov E. V. Business reengineering: Reengineering of organizations and information technologies. - M.: Finance and statistics, 1997. - 336 p.
32. Larichev O. I., Bebachuk B. Ts. Man-machine procedures for solving multicriteria linear programming problems with a hierarchy of templates // *Systems and methods of decision support*. Collection of works Ed. S. V. Emelyanova, O. I. Laricheva. - No. 12. M.: VNIISI, 1986. — S. 100–108.
33. Chereshekin D. S., Roizenzon G. V., Britkov V. B. Application of artificial intelligence methods for risk analysis in socio-economic systems // *Information Society*. — 2020. — No. 3. — pp. 14–24.
34. Popkov Yu.S. Mathematical Demoeconomics. Macrosystem approach. - M.: LENNAND. 2013. - 560 p.
35. Larichev O. I., Verbal Analysis of Solutions. - M.: Nauka, 2006. - 181 p.
36. Livshits V.N., Livshits S.V. System analysis of the non-stationary economy of Russia (1992-2010): market reforms, crisis, investment policy. - M.: Maroseyka, 2011. - 478 p.
37. Aliev R. A., Tserkovny A. E., Mamedova G. A. Production management with fuzzy initial information. - M.: Energoatomizdat, 1991. - 240 p.
38. Borisov A. N., Krumberg O. A., Fedorov I. P. Decision making based on fuzzy models: Examples of use. - Riga: 3inatne, 1990. - 184 p.
39. Emelyanov V.V., Yasinovsky S.I. Simulation modeling of systems: textbook. Series: Informatics at a technical university. — M. MSTU im. Bauman, 2009. - 584 p.
40. Roitman E.Ya. Problems of pricing for rolled heavy non-ferrous metals // *Non-ferrous metals*. - 2006. - No. 6. - S. 5–7.
41. Burkov V.N., Katsnelson M.B. Operational management of the supply of metal products. Solution of some optimization problems // *Automation and Telemechanics*. - 1970. - No. 1. - S. 148–158.
42. Makarov V. L., Bakhtizin A. R. Social modeling - a new computer breakthrough (agent-based models). — M.: Economics, 2013. — 295 p.
43. Sokhova Z. B., Redko V. G. Modeling the search for investment decisions by autonomous agents in a transparent competitive economy // *Artificial intelligence and decision making*. - 2019. - No. 2. - P. 98–108.

Rogulin Rodion S. PhD, Vladivostok State University. Gogolya str., 41a, Vladivostok, 690000, Russia. E-mail: rafassiaofusa@mail.ru