

## Благодарность

Автор статьи выражает благодарность предприятиям ООО «ДНС-Лес», ООО «Лесозаводский ЛПК» за предоставленную информацию.

Роголин Р.С. – аспирант<sup>1</sup>,  
Владивостокский Государственный Университет  
Экономики и Сервиса,  
г. Владивосток, Россия

## **Экономико-математическая модель анализа перспектив сотрудничества предприятия лесопромышленной отрасли и аукционного отдела товарно-сырьевой биржи России**

**Аннотация:** Целью данной статьи является провести глубокий анализ взаимодействия предприятия лесопромышленного комплекса с лесным отделом товарно-сырьевой биржи на аукционных торгах.

Для проведения анализа было выбрано имитационное моделирование. Для каждой отдельной имитационной итерации использовалась математическая модель линейного целочисленного программирования. Для генерации некоторых входных данных таких, как цена, спрос и др. использовался метод Монте-Карло.

Сложность задачи заключается в следующих аспектах: полиномиальный рост количества переменных; большое количество ограничений увеличивает степень сложности поиска первого допустимого решения модели; поиск решения в рамках целочисленной оптимизации; достаточно большое количество независимых имитационных итераций.

Практическая значимость исследования заключается в имитационной апробации возможности взаимодействия предприятия лесной отрасли на аукционных торгах товарно-сырьевой биржи России.

Результатом исследования стали, во-первых, математическая модель формирования цепочек поставок и объемов производства с учетом спроса на рынке и доступных объемов сырья на основе одного из прошедших периодов работы биржи, во-вторых, апробация модели на данных одного из предприятий лесной отрасли Приморского края. Оптимизация ведется по объему производимой продукции, объему закупаемого сырья из каждого региона и по запасам сырья на складе производства.

На основе апробации модели на данных биржи и предприятия лесной отрасли был проведен анализ возможности сотрудничества компании и товарно-сырьевой биржи. В работе отражены поведение в долгосрочной перспективе накопленной прибыли, характер изменения запасов сырья на складе и объем производимой продукции.

**Ключевые слова:** Цепочки поставок, экономика предприятия, лесная биржа, анализ данных, норма затрат ресурсов, вместимость склада.

Rogulin R.S. – Post-graduate student,  
Vladivostok State University  
Economy and Service,  
Vladivostok, Russia

## **Economic-mathematical model for analyzing the prospects for cooperation between the timber industry enterprises and the auction department of the Russian Commodity and Raw Materials Exchange**

---

<sup>1</sup> Роголин Родин Сергеевич – аспирант кафедры «Математики и моделирования», Владивостокский Государственный Университет Экономики и Сервиса, г. Владивосток, Россия (690014, Приморский край, город Владивосток, улица Гоголя, 41.); email: [rafassiaofusa@mail.ru](mailto:rafassiaofusa@mail.ru)

**Abstract:** The purpose of this article is to conduct an in-depth analysis of the interaction of the timber industry complex with the forest department of the commodity and raw materials exchange at the auction. For the analysis, simulation modeling was chosen. For each separate simulation iteration, a mathematical model of linear integer programming was used. To generate some input data such as price, demand, etc., the Monte Carlo method was used. The complexity of the problem lies in the following aspects: polynomial increase in the number of variables; a large number of restrictions increases the complexity of the search for the first feasible solution to the model; search for a solution within integer optimization; a sufficiently large number of independent simulation iterations. The practical significance of the study lies in the simulation testing of the possibility of interaction between the forest industry enterprises at the auction of the commodity exchange of Russia. The result of the study was, firstly, a mathematical model of the formation of supply chains and production volumes, taking into account market demand and available volumes of raw materials based on one of the past periods of the exchange's work, and secondly, testing the model on the data of one of the enterprises in the forest industry of the Primorsky Territory. Optimization is carried out according to the volume of production, the volume of raw materials purchased from each region and the stocks of raw materials in the production warehouse. Based on the testing of the model on the data of the exchange and the forest industry, an analysis was made of the possibility of cooperation between the company and the commodity exchange. The work reflects the long-term behavior of accumulated profits, the nature of changes in stocks of raw materials in stock and the volume of manufactured products.

**Keywords:** supply chains, enterprise economics, forest exchange, data analysis, resource consumption rate, warehouse capacity.

**Jel Classifications:** M2, C4.

## 1. Введение

В настоящее время в центре внимания многих исследователей находится управление цепочками поставок (Supply Chain Management, далее SCM), которое охватывает планирование производства всей цепочки поставок от поставщика сырья до конечного потребителя. Хотя SCM стал основой управления предприятием в XXI-м веке, существует большой интерес к использованию всего потенциала SCM в повышении организационной конкурентоспособности. SCM оказывает огромное влияние на эффективность организации с точки зрения конкуренции, основанной на цене, качестве, надежности, отзывчивости и гибкости на мировом рынке, и становится все более зрелой дисциплиной. В большинстве классических схем цепочек поставок цель состояла в том, чтобы отправлять продукты с одного уровня на другой для удовлетворения потребностей, чтобы сумма стратегических и тактических / эксплуатационных расходов была минимальной. Так, Amiri [1] разработал двухэтапную модель SC, чтобы выбрать оптимальное местоположение производственных предприятий и распределительных складов, чтобы отгружать продукцию с заводов потребителям с целью минимизации общих затрат распределительной сети. Новая трехступенчатая система распределения продукции с запасом была разработана, чтобы минимизировать общие затраты на поставку [2]. В работе [3] показано, что большинство реальных, как инженерных, так и экономических проблем на самом деле имеют несколько целей, то есть минимизировать затраты, минимизировать риски, максимизировать производительность, максимизировать надежность и т. д.

Это сложные, но реалистичные проблемы [4]. Многоцелевые задачи противоречат друг другу, одна цель может привести к неприемлемым результатам по сравнению с другими целями [5]. Разумное решение многоцелевой проблемы состоит в том, чтобы исследовать набор решений, каждое из которых удовлетворяет целям на приемлемом уровне [6]. В целом, при многоцелевой оптимизации, единственное оптимальное решение чаще всего не достигается, которое может оптимизировать все целевые функции одновременно.

Таким образом, многоцелевая оптимизация заключается не в поиске оптимального решения, а в поиске эффективного решения, которое сделает все целевые функции минимальными или обеспечит лучшее решение.

## **2. Краткий анализ литературных источников и постановка проблемы**

Цепочка поставок состоит из частей, прямо или косвенно участвующих в выполнении запроса клиента. Цепочка поставок включает в себя не только производителя и поставщиков, но и перевозчиков, склады, розничные продавцы и даже самих покупателей [7]. Цепочка поставок (Supply Chain, далее SC) - это интегрированная система объектов и видов деятельности, которая синхронизирует взаимосвязанные бизнес-функции закупок материалов, преобразования материалов в промежуточные и конечные продукты и распределения этих продуктов среди клиентов.

Scavarda [8], сформулировал проблему разнообразия продуктов с учетом развивающихся и развитых рынков, и они используют различные методы для сбора данных. В последнее время большое значение приобретает проектирование цепочки поставок в условиях неопределенности спроса [9]. Авторы работы [10] разработали модель смешанно-целочисленного нелинейного программирования (MINLP), чтобы помочь заинтересованным сторонам / лицам, принимающим решения, найти наиболее устойчивый дизайн в устойчивой среде. Например, в работе [11] предложена биобъективная двухэшелонная производственная распределительная сеть в условиях неопределенности спроса, чтобы минимизировать как общую стоимость цепочки поставок, так и общее время обслуживания, где они решили проблему стохастической оптимизации с помощью L-образного алгоритма. Авторы [12] расширили многопериодную трехэшелонную логистическую сеть прямого и обратного хода в условиях неопределенности, когда они рассмотрели три эшелона в прямом направлении и два эшелона в обратном направлении, чтобы максимизировать общую ожидаемую прибыль.

Между тем, [13], сформулировал еще одну двухэтапную стохастическую задачу SC в рамках краткосрочных операций и неопределенности спроса, чтобы минимизировать общие ожидаемые затраты на поставку. После этого коллектив авторов работы [14], рассматривал модель многопродуктового, многоступенчатого и многопериодного планирования с множеством несоизмеримых целей для многоуровневой цепочки поставок с неопределенными рыночными требованиями и ценами на продукцию.

Неопределенные требования рынка представляют собой реалистичную ситуацию для любого вида продукции и услуг, поскольку эта неопределенность является обычным явлением в оценке стоимости цепочки поставок.

Авторы [15] упомянули проблему проектирования сети цепочки поставок из нескольких продуктов, учитывая изменяющуюся во времени неопределенность с точки зрения ряда вероятных сценариев, и они решили эту проблему с помощью алгоритма ветвления и привязки. Авторы работы [16] рассмотрели проблему размещения и распределения задач со стохастическим спросом, чтобы принимать решения как на стратегическом, так и на операционном уровнях для максимизации прибыли, где для решения проблемы использовался усовершенствованный генетический алгоритм ((Genetic Algorithm, далее GA)). Кроме того, Olivares-Benitez [17], сформулировал новую би-целевую смешанно-целочисленную задачу SC, которую он решил тремя классическими методами ограничения, чтобы получить оптимальные по Парето точки для принятия решений.

Коллектив авторов работы [18] предложили сеть цепочек поставок многоэшелонированной производственной системы для автомобиля, которая включает в себя поставку материалов, изготовление компонентов, производство и распределение конечной продукции в условиях неопределенности цены и спроса. Авторы работы [19], предложили двухцелевую смешанно-целочисленную модель (Mixed-Integer linear programming, далее MIP), чтобы минимизировать общие затраты SC и максимизировать отзывчивость логистической сети с замкнутым контуром, и они использовали меметический алгоритм. Также авторы разработали алгоритм динамического поиска для решения этой проблемы. В работе [20] авторы вычислили замкнутую проблему проектирования логистической сети, состоящей из нескольких продуктов, в которой рассматриваются гибридные производственные / восстановительные мощности и гибридные распределительные / сборочные центры конечной емкости, и эта проблема была решена методом разложения Бендера. Mehrbod. M., Tu.N., Miao.L., Dai. W. в работе [21], разработали многоцелевую формулировку MIP, чтобы минимизировать общую стоимость SC, время доставки и время сбора использованных продуктов в замкнутой сети. Авторы работы [22] представили двухуровневую задачу определения местоположения, в которой прямой и обратный потоки рассматриваются одновременно, а для оценки этой проблемы была разработана эвристика Лагранжа [23]. Также был проведен анализ влияния неопределенности спроса на многоцелевую оптимизацию цепочек поставок химических веществ, одновременно рассматривая их экономические и экологические показатели. В работе [24] коллектив авторов предложил модель оптимизации для перепроектирования цепочки поставок запасных частей в условиях неопределенности спроса со стратегической и с тактической точек зрения в горизонте планирования, состоящем из нескольких периодов. Они учитывали эффект объединения рисков, который учитывался при определении уровня запасов в распределительных центрах и в зонах клиентов.

Существуют многочисленные методы решения многоцелевой оптимизации, которые обсуждаются в различной литературе, например, [25]. В этой работе проведена многоцелевая оптимизация для решения задачи формирования цепочки поставок с четырьмя эшелонами, чтобы уменьшить общую стоимость цепочки поставок, а также максимизировать скорость заполнения. Авторы использовали алгоритм MOPSO, который может быть оптимизирован более чем для двух конфликтующих целей одновременно в условиях неопределенности. В работе [26] разработана

многопериодическая структура для проектирования сети цепочки поставок для нескольких продуктов, чтобы снизить общие затраты цепочки поставок и среднее опоздание продукта в распределительные центры, а также повысить отзывчивость, используя новую многоцелевую биографию на основе оптимизации (MOBVO). В работе [27] предложена двухцелевая модель MIP для многоэтапной сети цепочек поставок, в которой авторы использовали шесть методов MODM, чтобы снизить общую стоимость и повысить скорость реагирования. Авторы работы [28], предложили модель расположения объекта для общей замкнутой цепочки поставок. Модель была разработана для нескольких заводов (производство и восстановление), рынков спроса, центров сбора и продуктов. Цель состояла в том, чтобы узнать, сколько и каких заводов и центров сборки должны быть открыты, и какие продукты и в каких количествах должны храниться в каждом из них. Целевая функция минимизирует общую стоимость. Затем модель была решена двумя методами, включая взвешенные суммы и методы с  $\varepsilon$ -ограничением. Кроме того, рассматриваются компромиссные поверхности тестовых задач. Многоцелевая модель также расширяется за счет стохастического программирования (на основе сценариев) для изучения влияния неопределенного спроса и прибыли на конфигурацию сети. Авторы работы [29] представили смешанную целочисленную многоцелевую модель программирования для сети медицинских поставок в условиях неопределенности. Их модель была направлена на оптимизацию трех противоречивых целей, включая минимизацию общих затрат, минимизацию воздействия на окружающую среду и максимизацию социальных обязанностей. Они определили несколько ограничений и двоичных переменных, чтобы преобразовать нелинейную модель в линейную, и использовали алгоритм декомпозиции ускоренных изгибов для решения этой проблемы. В работе [30] отражен подход к ранжированию и отбору лучших «зеленых» поставщиков в соответствии с экономическими и экологическими критериями в рамках SC. Следующим этапом работы модели является распределение оптимальных количеств заказов между ними. Предложенный подход представляет собой интеграцию теории нечеткой многоатрибутной полезности и многоцелевого программирования. Максимизация общей стоимости покупки и минимизация общей стоимости покупки одновременно являются целями модели. В работе [31] авторы предложили двухцелевую оптимизацию многопрофильной трехэтапной сети цепочек поставок, состоящей из производственных предприятий, распределительных центров (Distribution Centers, далее DC), каждый с неопределенным обслуживанием, и клиентских узлов. Двумя целями являются минимизация общей стоимости при максимальном увеличении среднего количества товаров, отправляемых покупателям. В этом документе рассматриваются только неопределенности в DC и для решения проблемы с использованием программного обеспечения GAMS исследуются шесть методов многоцелевого принятия решений (multi-objective decision making, далее MODM). В работе [31] также предложили двухцелевую оптимизацию многопродуктовой многопериодной трехэшелонной цепочки поставок в условиях неопределенности. Сеть состоит из нескольких производственных предприятий, DC и клиентских узлов. Вклад этой статьи состоял в том, чтобы приблизить существующие модели к реальности. Чтобы решить сложную проблему, был использован генетический алгоритм недоминированной сортировки (NSGA-II).

Поскольку в литературе не было доступных эталонных тестов, был использован другой алгоритм на основе ГА, названный генетическим алгоритмом недоминированного ранжирования (non-dominated ranking genetic algorithm, далее NPGA).

Авторы работы [32] разработали смешанную целочисленную нелинейную модель с целью помочь лицу, принимающему решение, выбрать наиболее устойчивую сеть цепочки поставок для проектирования и планирования деятельности предприятия. В структуре SC учитываются несколько сырьевых запасов, виды транспорта, регионы для производственных и распределительных центров. Была исследована устойчивая мера, которая основывалась на индексе энергетической устойчивости с точки зрения жизненного цикла. В работе [33] разработана процедура с целью минимизации затрат на расширение инфраструктуры, чтобы учесть будущую изменчивость спроса в цепочке поставок минерального сырья. Метаэвристическая формулировка была разработана на основе гибридизации смешанного целочисленного линейного программирования (mixed-integer linear programming, далее MILP) и метода имитации отжига, использующего преимущества различных уровней агрегирования данных. Процедура продемонстрировала способность решать производственные задачи разных размеров. В работе [34] рассматривалось планирование производства и распределение цепочки поставок с целью минимизации эксплуатационных и транспортных расходов в цепочке поставок в четыре эшелона. Для решения задачи был разработан эвристический алгоритм, основанный на Scatter Search, который учитывает равновесие Штакельберга.

Многие исследователи широко применяют ГА для решения проблем СКМ. Впервые были предложены многоцелевые SA<sup>2</sup> (multi-objective Simulated Annealing, далее MOEA) - метаэвристики, обычно используемые для поиска решений фронта Парето в многообъективных NP сложных задачах [35]. После работы [35] авторы статьи [36] предложили ГА найти набор парето-оптимальных решений многоцелевой цепочки поставок с четырьмя эшелонами, используя два различных подхода к взвешиванию. Авторы работы [37] разработали модель для SC двухуровневой системы сборки в условиях неопределенности времени выполнения заказа, чтобы минимизировать ожидаемые затраты на хранение компонентов и максимизировать уровень обслуживания клиентов. Они использовали две многоцелевые метаэвристики, основанные на ГА, чтобы решить эти проблемы. В работе [38] предоставлены сети SC, основанные на ГА (KBGA) для оптимизации. В работе [39] сформулирована многоцелевая модель смешанного целочисленного программирования для замкнутого цикла проектирования сети. В дополнение к общим затратам модель оптимизирует общие выбросы углерода и скорость отклика сети. Улучшенный генетический алгоритм, основанный на структуре NSGA II, разработан, чтобы решить проблему и получить оптимальные по Парето решения. Авторы работы [40] сравнили результаты, полученные с применением алгоритмов NSGA-2, NPGA, MOEA и PAES в случае биобъективной частичной гибкой задачи планирования работы.

---

<sup>2</sup> Simulated Annealing – имитация отжига (далее, SA).

Кроме того, [41], рассматривал двухступенчатую модель стохастического программирования, используемую для проектирования и управления цепочками поставок биодизеля на производства разных типов. Модель отражает влияние неопределенности в поставках биомассы и технологий на решения, связанные с цепочкой поставок. Они решили эту проблему, используя алгоритмы, сочетающие релаксацию Лагранжа и методы L-образного решения. В работе [42] классифицируется население по недоминируемым фронтам, используя алгоритм NSGA.

Авторы работы [43] предложили задачу триобъективной оптимизации для цепочки последовательных поставок двух эшелонов. Они рассмотрели модификацию генетического алгоритма недоминированной сортировки-II (NSGA-II) с алгоритмом мутации, который был встроен в модифицированный NSGA-II для решения проблемы. Алгоритм NSGA-II показал лучшие результаты, чем существующие наиболее известные в литературе результаты, по этой причине автор решил найти оптимальное по Парето решение.

Исходя проведенного краткого обзора литературы на тему SCM можно с уверенностью утверждать о глубокой проработке и актуальности темы. Однако, считаем возможным утверждать об отсутствии работ, которые бы освещали следующие экономические факторы:

1. Оценку эффективности какого-либо варианта сотрудничества предприятия лесной направленности с товарно-сырьевыми биржами в рамках аукционных торгов.
2. Оценку эффективности возможности взаимодействия предприятия лесной отрасли с товарно-сырьевой биржей в долгосрочной перспективе.
3. Прогнозирование суммарной прибыли предприятия за время работы с лесным сектором товарно-сырьевой биржи.
4. Анализ рисков работы предприятия лесной отрасли в условиях отсутствия собственного источника сырья в виде делян.

### **3. Цели и задачи исследования**

*Целью исследования* является анализ возможности взаимодействия в долгосрочной перспективе товарно-сырьевой биржи на аукционных торгах и предприятия лесной отрасли с учетом разных производственных ограничений.

Выдвигаются следующие *задачи* для достижения цели *исследования*:

- Разработать модель, позволяющую максимизировать доналоговую прибыль предприятия на основе изменения цен в определенных границах, изменения спроса в определенных границах, изменения норм объемов сырья потребных для производства каждой единицы продукции, оптимизации планирования закупок и объёмов производства с использованием уже реализованных заявок на товарно-сырьевой бирже за прошедший период, структуры и объёмов предложений на российской товарной бирже и спроса на готовую продукцию;
- Апробировать модель в условиях реального предприятия и исследовать вычислительные аспекты применения модели;
- Провести анализ полученных результатов в ходе работы модели.

### **4. Модель формирования эффективных планов закупок сырья и выпуска конечных видов продукции**

Рассмотрим возможности предприятия по получению сырья. Всего можно указать три возможности предприятия по получению сырья. Первый заключается в получении в аренду от государства участка и преобразовании его в деляну. Второй – закупка сырья напрямую у делян или производств со своими делянами. Третий – закупка сырья с биржи. Мы же сосредоточимся на только на последнем варианте.

Таким образом, рассматривается задача формирования оптимальных планов закупки сырья и выпуска продукции производственной компании лесной отрасли на заданном горизонте планирования  $M$  с учётом, во-первых, предложений на рынке со стороны лесодобывающих предприятий и, во-вторых, спроса на готовую продукцию.

В начальный момент времени  $t = 0$  происходит планирование закупок сырья и производство продукции на весь заданный горизонт  $t \in \{0, 1, \dots, M\}$ . На этом горизонте для каждого  $t$ -го дня заданы: набор предложений на рынке сырья в виде заявок на товарно-сырьевой бирже и спрос на производимую продукцию на рынке, полученный от предприятия за 2019 год. Заявка на бирже задаётся регионом лесодобывающей компании, объёмом и ценой, включающей стоимость доставки. Спрос на рынке готовой продукции задаётся возможной ценой продажи для каждого вида продукции.

В качестве целевой функции положим максимизацию накопленной прибыли.

Для того, чтобы провести оценку эффективности взаимодействия предприятия и какого-либо агента на любой срок необходимо провести достаточное количество итераций  $iter$ , независимо работающих друг от друга.

Положим следующие обозначения:

$c_{ilrm}$  – цена покупки 1 м<sup>3</sup> из  $i$ -й заявки сырья  $l$ -го типа в  $r$ -м регионе в  $t$ -й день (руб), включая стоимость доставки;

$V_{ilrm}$  – объём сырья типа  $l$  в заявке  $i$  из региона  $r$  в день  $t$  (м<sup>3</sup>);

$v_{ilrm}$  – покупаемый объём сырья типа  $l$  из заявки  $i$  из региона  $r$  в день  $t$  (м<sup>3</sup>);

$u_{lm}$  – запас на складе сырья типа  $l$  день  $t$  (м<sup>3</sup>);

$u_m^{max}$  – максимальная вместимость склада в день  $t$  (м<sup>3</sup>);

$v'_{ilrm}$  – объёмы сырья типа  $l$ , купленные в предыдущем периоде, про которые известно, что они поступят на склад в день  $t$  (м<sup>3</sup>);

$A_{lk}^{month}$  – количество затрат ресурса  $l$  на производство единицы товара  $k$  по технологии в месяц  $month$  (м<sup>3</sup>);

$p_{km}$  – цена продажи товара типа  $k$  в день  $t$  (руб);

$z_k$  – себестоимость продукции за вычетом стоимости основного используемого сырья (лесоматериалы);

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

$FC_\mu$  – фиксированные издержки для имитационной итерации  $\mu$  (руб),  $\mu = 1: iter$ ;

$x_{km}$  – объём производства товаров типа  $k$  в день  $t$  (шт);

$I$  – количество заявок, которые были куплены в предыдущий период (до  $t = 0$ ) и дата их прихода на склад заранее известна;

$R$  – количество регионов откуда идут заявки  $I$ ;

$T_r$  – норма временных затрат (в днях) на доставку любого объема сырья из региона  $r$  по ж/д;

$Q_{nkm}$  – спрос потребителя  $n$  на товар  $k$  в день  $t$ ;

$\dot{Q}_{nkw}$  – математическое ожидание объема спроса на продукцию типа  $k$  в неделю  $w$ , потребителем  $n$ ;

$M$  – рассматриваемый горизонт планирования (дни), называемый текущий период;

$\dot{M}$  – количество дней из текущего периода, для которых закупленные заявки поступят на склад в следующий период,  $l$  – вид сырья для производства готовой продукции,  $l = 1, \dots, L$ ;

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

значения параметров  $u_{l0}, Budget_0$  задаются и соответствуют последнему дню предыдущего периода;

$\dot{x}_{km}$  – гипотетический объем производства продукции типа  $k$  в день  $m = M + 1 : \dot{M}$ , который определяется следующим образом:

$$\dot{x}_{km} = \left\lfloor \frac{1}{2} \left( \max_{m^* \in [m-t, m]} (x_{km^*}, \dot{x}_{k(m^*-1)}) + \min_{m^* \in [m-t, m]} (x_{km^*}, \dot{x}_{k(m^*-1)}) \right) \right\rfloor$$

, где  $t$  – количество дней, за которые выбираются максимальные и минимальные значения  $x_{km^*}$  в ограничениях (3), (4) соответственно.

В качестве целевой функции будем рассматривать доналоговую прибыль предприятия на горизонте планирования  $M$ .

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

$$u_{lm} = u_{l(m-1)} + \sum_{i,r} v_{ilr(m-T_r)} + \sum_{i \in I, r \in R} v'_{ilr(m-T_r)} - \sum_k A_{lk}^{month} x_{km}, l = 1:L, m = 1:M \quad (2)$$

$$\sum_l u_{lm} \leq u_m^{max}, m = 1:M + \dot{M} \quad (3)$$

$$u_{lm} \geq u^{min}, l = 1:L, m = 1:M + \dot{M} \quad (4)$$

$$\sum_k A_{lk}^{month} x_{km} \leq u_{lm}, l = 1:L, m = 1:M \quad (5)$$

$$Bud_0 + \sum_{m=1}^{m^*} \left( \sum_k (p_{km} - z_k) x_{km} - \sum_{i,l,r} c_{ilrm} v_{ilrm} - FC_m \right) \geq 0, m^* = 1:M \quad (6)$$

$$x_{km} \leq \sum_n Q_{nkm}, k = 1:K, m = 1:M \quad (7)$$

$$0 \leq v_{ilrm} \leq V_{ilrm} \quad (8)$$

$$Bud_0 = const \quad (9)$$

$$u_{l0} = const \quad (10)$$

$$u_{lm}, x_{km}, v_{ilrm} \in Z^+ \quad (11)$$

$$u_{lm} = u_{l(m-1)} + \sum_{i,r} v_{ilr(m-T_r)} + \sum_{i \in I, r \in R} v'_{ilr(m-T_r)} - \sum_k A_{lk}^{month} \dot{x}_{km}, l = 1:L, m = M + 1:\dot{M} \quad (12)$$

$$p_{k(m+1)} = p_{km} * \varepsilon_k^1, \varepsilon_k^1 \in [-\alpha^1, \beta^1] \quad (13)$$

$$A_{lk}^{month+1} = \max(0, A_{lk}^{month} + \varepsilon_{lk}^2), \varepsilon_{lk}^2 \in [-\alpha^2, \beta^2] \quad (14)$$

$$u_{m+1}^{max} = \max(u_m^{max}, u_m^{max} + \varepsilon_m^3), \varepsilon_m^3 \in [-\alpha^3, \beta^3] \quad (15)$$

$$Q_{nkm} = \dot{Q}_{nkw} + \varepsilon_{nkw}^5, \varepsilon_{nkw}^5 \in [-\alpha^5, \beta^5], w = w(m) \quad (16)$$

$$FC_\mu = \varepsilon_\mu^4, \varepsilon_\mu^4 \in [\alpha^4, \beta^4] \quad (17)$$

, где  $\varepsilon_k^1, \varepsilon_{lk}^2, \varepsilon_m^3, \varepsilon_\mu^4$  – равномерно распределенные случайные величины,  $\varepsilon_{nkW}^5$  – дисперсия случайной величины  $\dot{Q}_{nkW}$  на момент начала недели  $w$  на товар  $k$  для потребителя  $n$ ;  $\alpha^g, \beta^g \geq 0, g = 1:5$ ;  $\alpha^g, \beta^g \in Z^+, g = 2:4$ .

Ограничение 1 – целевая функция, отражающая суммарную прибыль производства. (2) отражает рекуррентное соотношение объема каждого вида сырья каждый день в зависимости от периода планирования. (3-4) гарантируют наличие сырья на складе в пределах между минимальным запасом и максимальной вместимостью на складе. (5) утверждает, что суммарное количество затраченного каждого вида ресурса не превысит запаса соответствующего типа сырья на складе в день  $t$ . (7) утверждает минимальный объем бюджета в день  $t^*$ . (8) ограничивает объем производства спросом на рынке. (9-10) – входные данные. (11) гарантирует целочисленность полученного решения. Отметим, что перед вычислением оптимальных значений модели (1-11) вычисляются (13-17). (12) при поиске оптимального решения не участвует, поэтому (12) вычисляется после найденного оптимального решения модели (1-11). Серия ограничений (13-17) вычисляются на момент начала работы имитации. Ограничение типа (13) призвано с целью отразить изменение цены во времени. Ограничение (14) отражает изменение технологической матрицы. (15) отождествляет изменение предельного объема сырья на складе. (16) утверждает изменение спроса на основе данных предприятия за 2019 год. (17) отражает объем постоянных издержек на предприятии для каждой итерации.

Задача (1-11) представляет собой задачу MILP. Рассмотрим ее особенности. Первое – количество переменных растет с полиномиальной скоростью ( $O(\alpha^4)$ )<sup>3</sup>. Второе – количество ограничений с высокой вероятностью накладывает серьезную сложность на поиск первого допустимого решения, т. к. может резко расти полиэдральное допустимое множество решений<sup>4</sup>. Третье – поиск целочисленного решения. Четвертое – количество независимых итераций по работе модели.

Для учета первых трех особенностей будем использовать смешанный алгоритм Гоморри и Ветвей и границ<sup>5</sup>, позволяющий максимально быстро находить допустимое решение, осуществлять максимально эффективно поиск оптимального /эффективного решения.

Для учета последней особенности положим, что на каждый день, задействованный в модели, необходимо произвести итераций в минимум 4 раза больше. Т. е. на каждый день приходится не менее 4 итераций, что позволяет утверждать о достаточности проработке проблемы. Однако, в этом случае возрастает количество последовательных вычислений. Для этого воспользуемся инструментарием Параллельного программирования.

### Тестирование модели и калибровка

Для апробации модели было выбрано предприятие ООО «ДНС-Лес» (далее, ДНС). Компания находится на стадии непрерывного производства определенных видов товаров. По определенным независимым от нее административным причинам

<sup>3</sup>  $\alpha^4$  – т. к. 4 индекса, потому что 4 – это максимальное количество индексов у переменных.

<sup>4</sup> Имеется ввиду:  $\sum_n Q_{nkW}$ . Если последнее слишком большие принимает значения, то алгоритму сложно осуществлять поиск допустимого или оптимального решения (см. дополнительно [1, 8, 29]).

<sup>5</sup> MathWorks. Documentation. Intlinprog. [Электронный ресурс]: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html>

компания не может получить в аренду участки для добычи сырья, поэтому предприятие закупает сырье у продавцов из Приморского края. Однако, предприятие ставит задачу об анализе возможности взаимодействия его с Санкт-Петербургской Международной Товарно-сырьевой Биржей<sup>6</sup> (далее, биржа). В качестве видов сырья предприятие интересуют 2 основных вида сырья: пиловочник ( $l = 1$ ) и балансы ( $l = 2$ ). Породы сырья не имеют значения ввиду технологических особенностей. Данные по результатам торгов на бирже выкладываются на официальном сайте, где можно увидеть совершенные сделки за любой период.

В нашей экономике задействованы 11 месяцев (с 01 февраль 2019 года по 30 ноября 2019 года) или 302 дня ( $M$ ), суммарно по всем видам сырья 1649 заявок. Согласно, данным биржи за это время в работе участвовали предприятия по лесозаготовке с 4-х регионов в качестве продавцов сырья: Иркутская область (1), Республика Удмуртия (далее, Удмуртия (2)), Московская область (3), Пермский край (4). Т. к. биржа скрывает реальные названия и местоположения продавцов, то более детальная информация по продавцам отсутствует. За обозначенный период был получен массив следующих данных с предприятий и биржи: цены ( $c_{irm}$ ), даты ( $m$ ) появления сырья, объемы ( $v_{irm}$ ) в эти дни, цены заявок ( $p_{km}$ )<sup>7</sup>, количество заявок по каждому типу сырья (\*). Кроме того, известен спрос  $\sum_n Q_{nkm}$  в каждый день каждого вида товара исходя из статистики продаж предприятия.

Кроме того, предприятие имеет свои входные данные, изложенные в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Входные начальные и постоянные данные.

Параметр, ед. измерения	Значение параметра
$u_0^{max}$ , м <sup>3</sup>	7750
$u_0^{min}$ , м <sup>3</sup>	100
$u_{l0}$ <sup>8</sup> , м <sup>3</sup>	[2250, 2250]
$p_{k0}$ , т. р.	[17.1, 25.8, 35.8, 40.75, 42.5, 47.55, 54.5, 59.5, 69.95]
$T_r$ , дни	[3, 5, 6, 5]
$Bud_0$ , руб	10 000 000
$FC_0$ , руб	1 000 000

Источники: ООО «ДНС-Лес»<sup>9</sup>.

Поскольку предприятие ДНС, достаточно, молодое, т. к. ведет производство лишь с января 2019 года, то по понятным причинам статистических данных по данным для вектора  $\varepsilon$  у нее недостаточно. Поэтому воспользуемся данными предприятия, которое занимается более 20 лет производством и добычей сырья на рынке Приморского края и за границей<sup>10</sup>. Эти данные отражены в таблице 3.

В таблице 2 представлены значения  $A_{lk}$ , м<sup>3</sup>.

<sup>6</sup> Официальный сайт «Санкт-Петербургской Международной Товарно-сырьевой Биржи» (АО «СПбМТСБ»), [Электронный адрес]: <https://spimex.com/markets/wood/trades/results/>

<sup>7</sup> Считаем, что цены не меняются за все время работы по поиску оптимального решения.

<sup>8</sup> На начальный момент ( $m = 0$ ) работы алгоритма (входные данные).

<sup>9</sup> Официальный сайт Предприятия ООО «ДНС-Лес». Россия, Приморский край, г. Спасск-Дальний. [Электронный ресурс]: <http://dns-les.ru/>

<sup>10</sup> ООО «Лесозаводский ЛПК».

Тип сырья ( $l$ ) \ номер товара ( $k$ )	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\sum_k A_{lk}$
1	3	4	5	4	5	5	7	5	9	47
2	2	4	4	6	6	7	6	9	7	51

Источники: ООО «ДНС-Лес».

Таблица 3 – Изменяемые параметры и их диапазоны.

Параметр <sup>11</sup>	Значение параметра
$\varepsilon_k^1$	$[1-0.00095, 1+0.00075]$ <sup>12</sup>
$\varepsilon_{lk}^2$	$[-1, 10]$
$\varepsilon_m^3$	$[-100, 10]$
$\varepsilon_m^4$	$[0.999, 1.001]$
$\varepsilon_{nkm}^5$	$[-10, 10]$

Источники: ООО «Лесозаводский ЛПК»

Рассмотрим инструментальную сторону задачи. Воспользуемся языком программирования Matlab, функцией `intlinprog`<sup>13</sup>. В качестве входных параметров положим: целевую функцию, умноженную на  $-1$ <sup>14</sup>; ограничение целочисленности; матрицы ограничений; векторы правых сторон для ограничений типов равенств и неравенств; нижние и верхние границы значения переменных; начальную точку для поиска решения (пустой вектор); максимальное количество вершин полиэдрального множества допустимых решений, которое может пройти алгоритм (ед). Рассмотрим последнее. Т. к. задача имеет большую размерность, то мы не можем гарантировать, что оптимальное решение будет найдено за адекватное время, поэтому было решено ограничить количество проходимых вершин множества допустимых решений в размере  $10^7$  ед. В случае, если решение было найдено, но алгоритм вышел из цикла в связи с описанным выше ограничением, будем считать, что решение не носит характер оптимального, а носит условно характер эффективного. В качестве технологии параллельного программирования воспользуемся MPI, также встроенной в Matlab<sup>15</sup>.

В качестве процессора, на котором будет проводиться численный эксперимент, был выбран AMD Ryzen 2600x<sup>16</sup> с частотой до 4.2 ГГц, с 12-ю потоками. Другими словами, количество параллельных вычислений составляет 12 итераций одновременно.

В качестве количества итераций положим 10 000 ед. Таким образом, на каждый день придется более 33 итераций, что позволяет утверждать о достаточности их количества.

<sup>11</sup> Все случайные величины имеют равномерное распределение.

<sup>12</sup> За 11 месяцев работы планируемого периода  $p_{km} = p_{k0} * \prod_k \varepsilon_k^1 = p_{k0} + [-25\%, 25\%]$ .

<sup>13</sup> `intlinprog`. Документация. MathWorks. [Электронный доступ]: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html>

<sup>14</sup> Умножением на -1 обусловлено спецификой встроенной функции `intlinprog`. По умолчанию она направлена на поиск минимального значения целевой функции.

<sup>15</sup> `mpiSettings`. Документация. MathWorks. [Электронный доступ]: <https://www.mathworks.com/help/parallel-computing/mpisettings.html>

<sup>16</sup> AMD Ryzen™ 5 2600X. AMD. [Электронный доступ]: <https://www.amd.com/ru/products/cpu/amd-ryzen-5-2600x>

По корпоративным причинам в работе не указывается реальный зафиксированный спрос  $\dot{Q}_{nkm}$ . Однако, данные касательно спроса  $ave(\sum_n Q_{nkm})^{17}$  представлены на рисунке 1.

### Обсуждение

На поиск всех *iter* шт. решений было задействовано почти два часа. Каждое решение носит характер оптимального. Все решения получены по факту прохождения менее 90 000 вершин допустимого полиэдрального множества решений.

Рассмотрим рисунок 1. Светло-синим цветом отражена динамика изменения средней цены по всем итерациям. Из рис. 1 следует, что в среднем спрос падает к лету, а после него наблюдается неуверенный рост. Кроме того, средний спрос на каждый технологически более сложный товар меньше предыдущего. Это можно связать, во-первых, с ценовой политикой предприятия, во-вторых, с сезонностью данного бизнеса.

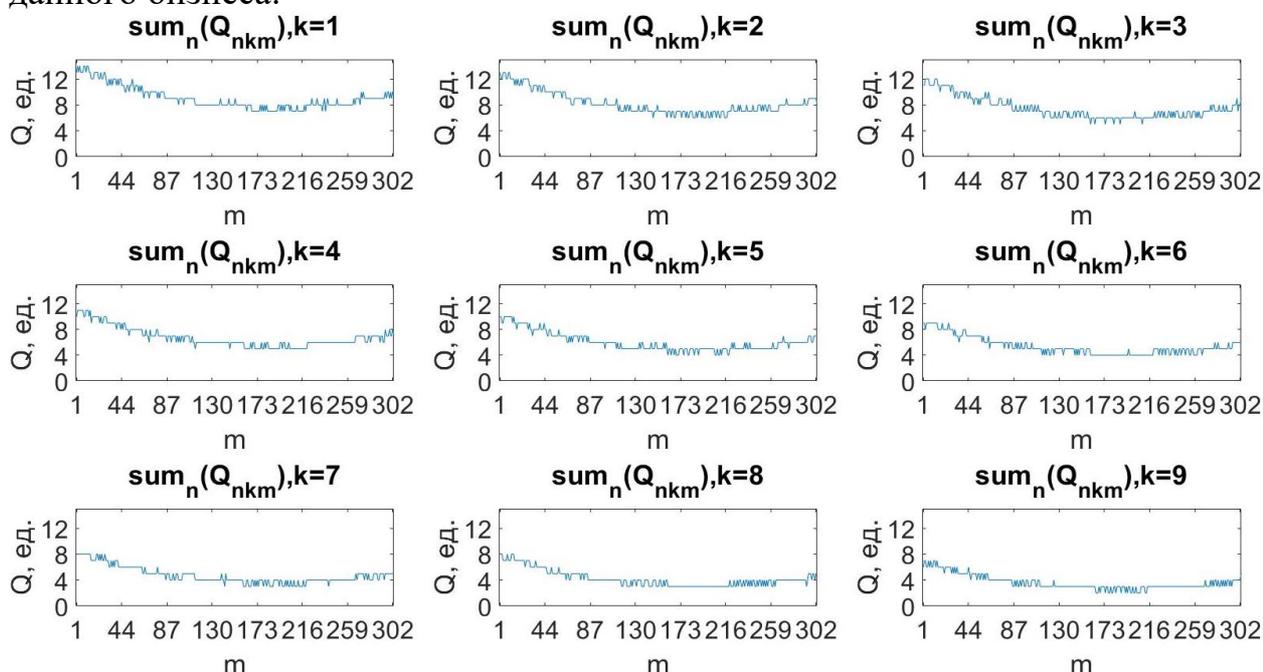


Рисунок 1 – Визуализация округленных средних значений  $ave(\sum_n Q_{nkm})$

Рассмотрим рисунки 2 и 3. Светло-зеленым отражены суммарные поставки из регионов России по дням, темно-зеленым отражены текущие по дням состояния на складе каждого типа сырья, красным отражены средние запасы каждого типа сырья на складе. Под  $v_{lm}$  понимается поступления сырья типа  $l$  на склад в день  $m$ . Исходя из этих рисунков можно сделать вывод о том, что первого типа сырья на складе в среднем больше, чем второго. Далее можно заметить, что частота колебания средние значений запасов сырья на складе не высокая, что позволяет утверждать о том, что предприятие ведет интенсивное производство и в период, когда наблюдается спад спроса на один тип товара заменяет его производство более интересным для покупателя. Также можно заметить, что в конце горизонта планирования намечается спад запасов каждого типа сырья на складе. Кроме того, можно заметить, что

<sup>17</sup> Под  $ave(\dots)$  будем понимать округленные средние значения за все итерации.

выполняются условия (3-4) о минимальных и максимальных объемах сырья на складе.

Можно заметить основные 3 периода всплеска высокой интенсивности поставок сырья первого типа. Первый – февраль и март. Второй – май и июнь. Третий – август и сентябрь. Последний объясняется началом восстановления интереса потребителя к товарам лесоперерабатывающей отрасли. Первый – это традиционный период высокого спроса товаров. Однако, понять причины появления второго периода довольно сложно. Для этого требуются дополнительные исследования, лежащие за пределами данного исследования.

Также следует отметить, что периоды всплесков объемов сырья на складе для второго типа сырья отличаются от первого. Здесь также условно можно выделить три основных периода. Первый – первая половина февраля. Второй – вторая половина марта и по конец мая. Третий с 10-х чисел июня по первую половину октября. Первый период является, аналогично с первым типом сырья, ожидаемым на рынке. Второй, вероятно, можно объяснить заготовкой необходимо вида сырья перед небольшим скачком (1.5 месяца) интенсивного производства. Третий сложно поддается описанию, т. к. нет общего обоснования этому процессу. Будем считать, что это подлежит дополнительно исследовать в будущих работах.

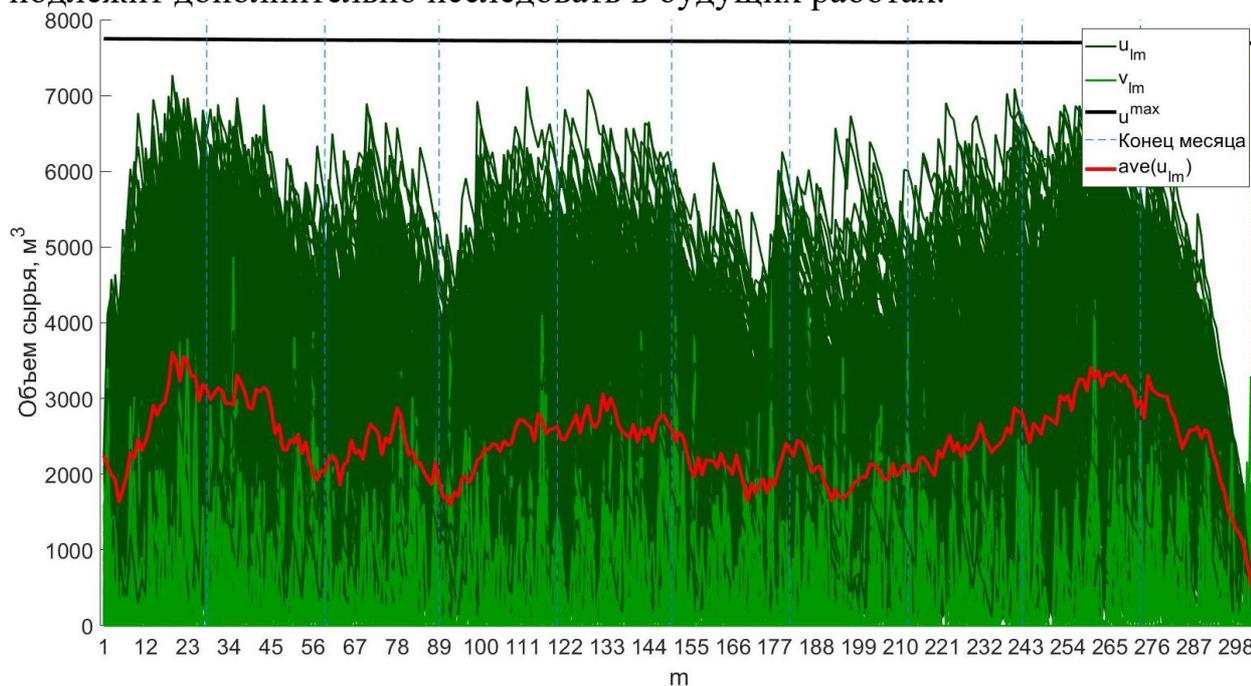


Рисунок 2 – Визуализация состояния наполненности склада сырьем при  $l = 1$

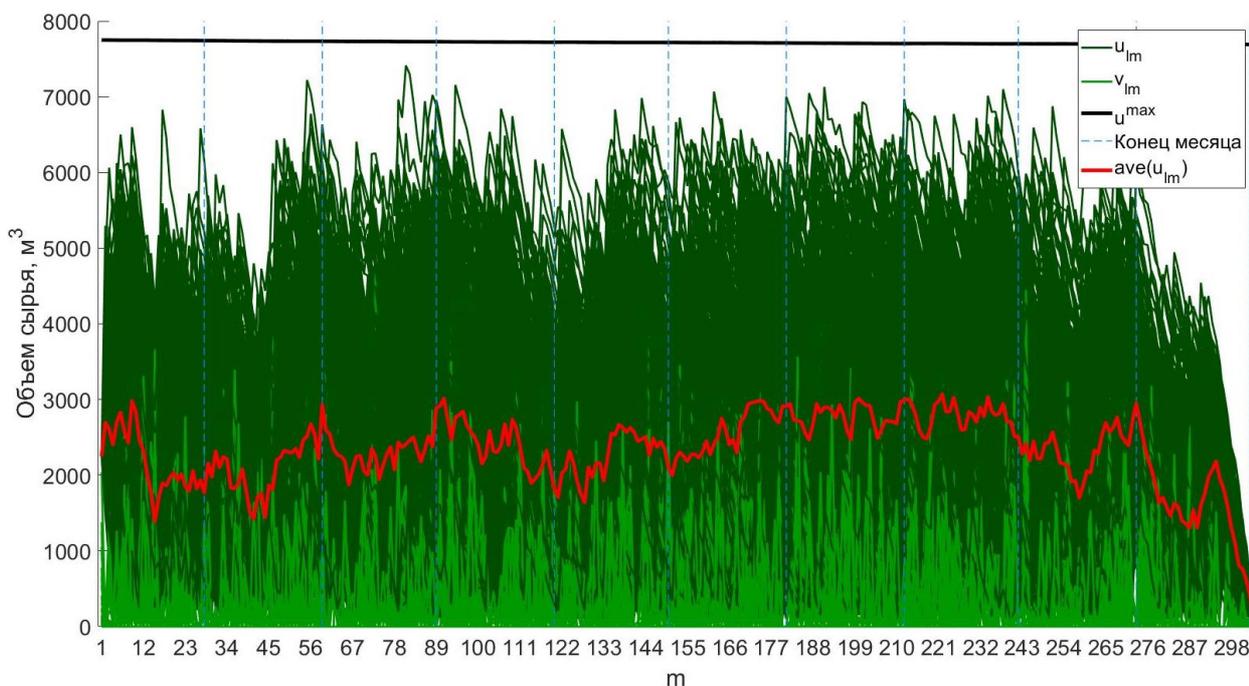


Рисунок 3 – Визуализация состояния наполненности склада сырьем при  $l = 2$

Рассмотрим рисунок 4. Красным обозначены суммарные объемы сырья на складе по всем видам каждый день, черным обозначены средние объемы сырья на складе, светло-зеленым поступления сырья на склад в среднем суммарно каждого типа. Рассмотрим красный «фон». Такой «фон» говорит о планировании производственного плана, т. к. в зависимости от номера *iter* поступления сырья на склад могут сильно отличаться. Относительно не большие колебания средних значений поступающих объемов суммарно по всем типа сырья на склад дают возможность утверждать, что производство в среднем работает равномерно по степени интенсивности, не смотря на сезонность спроса. Здесь можно также отметить, что к середине ноября поступления на склад начали восстанавливаться в своих «обычных» ритмах, но т. к. к концу периода планирования отсутствует спрос на товар, то средние объемы поступления сырья также падают. Стоит обратить внимание на светло-зеленую линию. По мере движения по оси  $0m$  можно увидеть, что тренд поступлений незначительно падает. Таким образом, рассмотрев поведения одновременно черной и светло-зеленой линий можно утверждать о смене приоритетов в производстве товаров, что позволяет получать максимальную прибыль и максимально уменьшить расходы сырья.

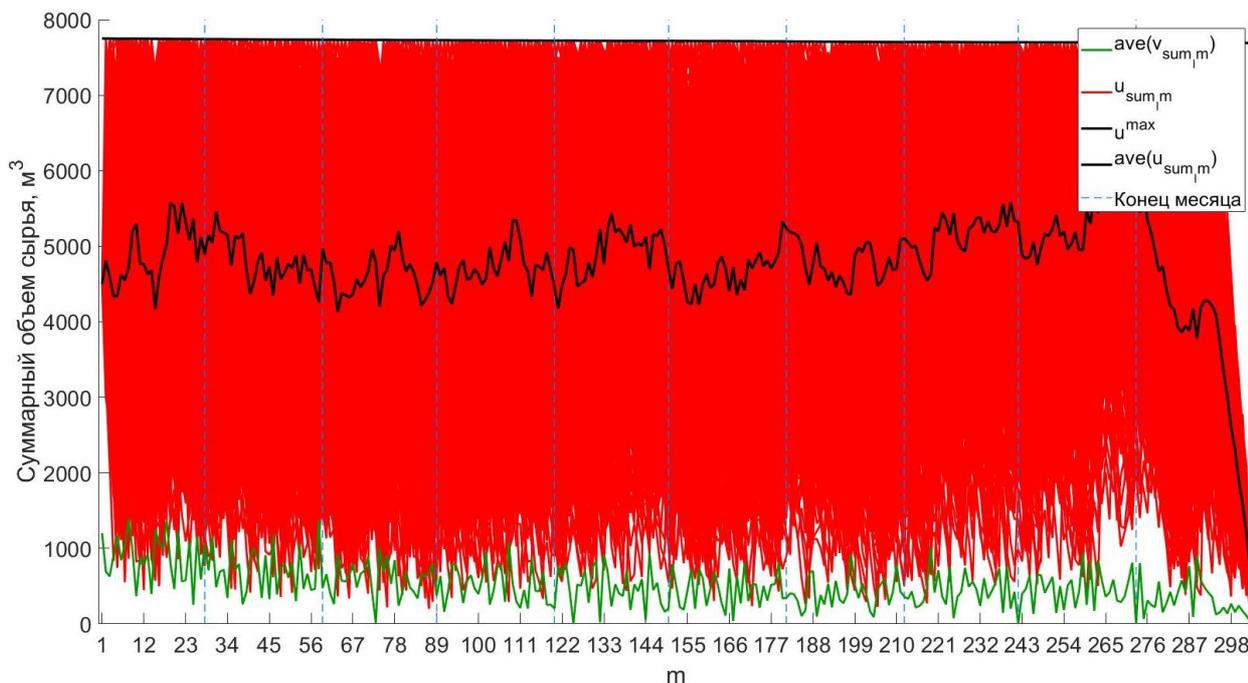


Рисунок 4 – Визуализация состояния наполненности склада суммарно по всем видам сырья

Рассмотрим рисунок 5. На рисунке 5 отражены изменения в суммарной и ежедневной прибылях предприятия. Черными линиями отражены движения денежных средств ежедневно. В первом случае происходит отражение накопленной прибыли, во втором случае – ежедневной. Рассмотрим прибыль накопленную.

Здесь отчетливо наблюдаются несколько периодов экономики предприятия. Первый – подъем, который также, в свою очередь, разделяется на два других типа: стабильный и неуверенный. Названия последних двух типов говорят сами за себя. Второй – стабилизация. Третий – спад.

Для того, чтобы понять причины такого поведения прибыли необходимо рис. 5 рассмотреть вместе с рисунком 6.

На рисунке 6 отражены объемы производства каждого типа товаров. Обратимся к рисунку 5. Найдем период, когда рост прибыли был максимален. Это период с февраля по апрель. Обратим внимание на схожесть структуры производства – соотношение произведенных товаров. Оно близко к одинаковому. Это говорит о том, что предприятие должно стремиться к этому соотношению для получения максимальной прибыли. После апреля намечается изменение в структуре производства. Предприятие подстраивается под интересы рынка, что влечет к уменьшению накопленной прибыли. Затем происходит стабилизация доходов на период с мая по конец июля. С августа по октябрь начинается работа предприятия в убыток. Сказывается одновременное влияние фиксированных издержек и спроса на товары предприятия. После октября намечается устойчивый рост значения прибыли.

Помимо этого, стоит отметить, что дисперсия значений прибыли незначительна в масштабах лесной отрасли. Этот факт позволяет утверждать, что данный процесс может быть достаточно хорошо прогнозируемым с ошибкой в относительно несерьезных пределах.

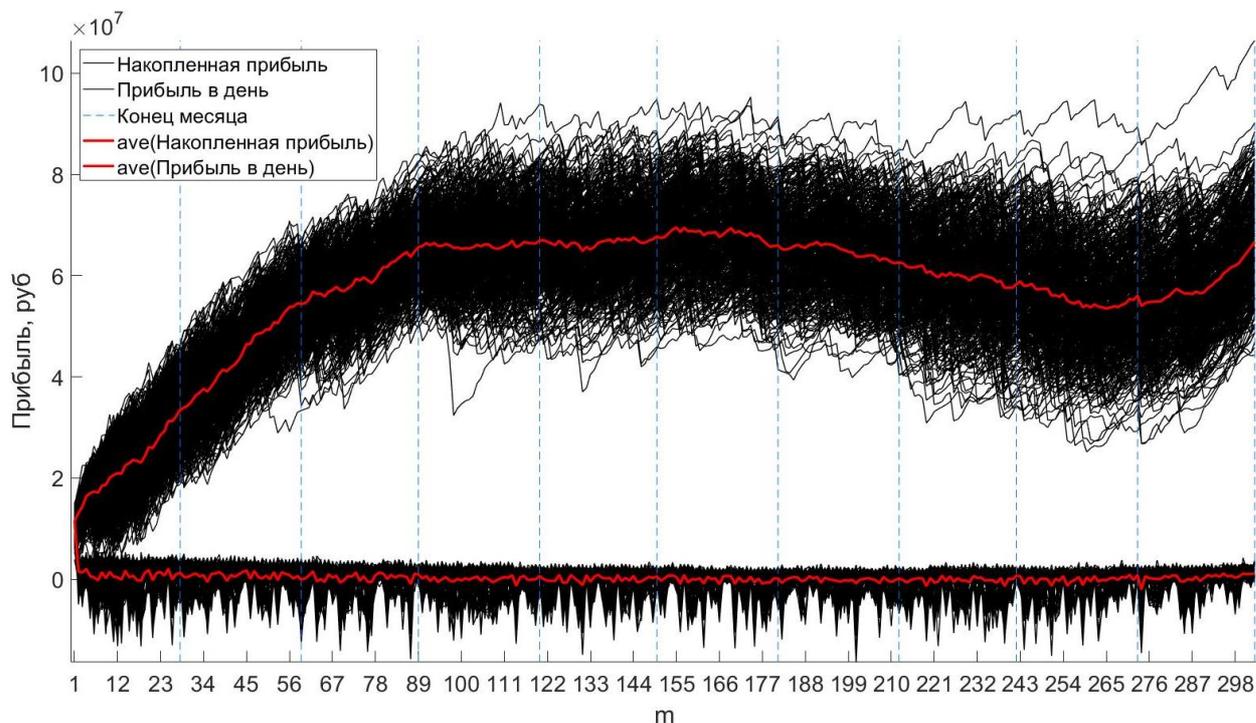


Рисунок 5 – Визуализация динамики денежных средств в разрезе каждого дня

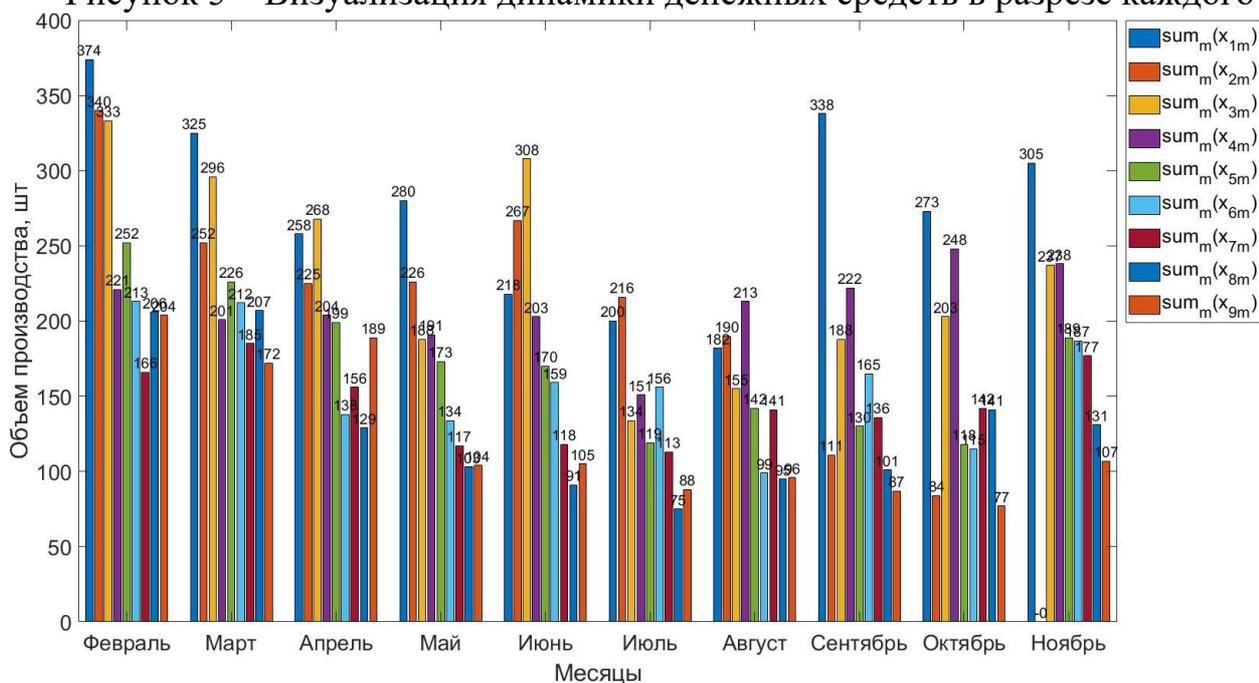


Рисунок 6 – Визуализация объемов производства каждого из товаров по месяцам

На рисунках 7 и 8 отражены объемы купленного сырья на бирже в разрезе регионов по месяцам. Столбики поделены на двое. Нижняя часть столбика означает объем, который был куплен в этот месяц в этом регионе. Сумма верхнего и нижнего столбика означает суммарное предложение на рынке.

Из этих рисунков следует, что наибольший объем сырья поступило из Иркутской области. Этот феномен можно объяснить тем, что Иркутская область очень давно участвует на торгах биржи и за время работы на ней деляны уже успели ощутить все положительные стороны этого инструмента торговли. В то время, как остальные регионы еще только начинают осваивать этот ресурс. Однако, в разрезе каждого месяца есть примеры, когда из Иркутской области было мало поставок

относительно других регионов. Это связано с ценой на ресурс. В Иркутской области он всегда значителен. Объяснение этому факту географически простое – Китай. Если посмотреть на ЖД карту<sup>18</sup> России, а именно на Восточно-Сибирскую ЖД, то не трудно заметить прямую ветку в Китай, по которой уходит сырье. Китайские предприниматели мало смотрят на цену сырья. Курс доллара и высокая инфляция в России делают цены на сырье очень высокими для рядового бизнеса при этом для Китайской стороны цена может оставаться стабильной.

Отметим, что объем вывозимого сырья из каждого региона в 90% случаев не превышает 10%, что говорит о значительной для производства глубине сырьевого рынка.

Также из рисунков 7 и 8 следует, что объем добываемого сырья любого типа убывает по мере приближения к весне и лету и возрастает по мере приближения к зиме.

Это связано с транспортными проблемами при добыче сырья. Как правило, производство идет на хитрость, которая в случае вскрытия надзирающими органами влечет за собой административную и уголовную ответственности, а также отзыв аренды участка для добычи сырья. Хитрость заключается в том, что в Министерстве природных ресурсов и экологии Российской Федерации утверждают нормы вырубki лесов каждый год по кварталам. Однако, т. к. в период весенней и осенней распутицы, летних высоких температур добывать сырье сложнее, ввиду трудной доступности<sup>19</sup> к сырью, предприниматели вырубают зимой больше, чем положено в квартал, а в годовой отчетности равномерно распределяют добытый объем сырья, что, несомненно, ведет к неправильной эксплуатации лесных ресурсов РФ. На рынке, отчетливо можно заметить эту тенденцию (рис. 5 и 6)<sup>20</sup>.

---

<sup>18</sup> Express+. Железнодорожная карта России. Восточно-Сибирская железная Дорога. [Электронный ресурс]: <http://www.expresstk.ru/wp-content/uploads/2017/08/Vostochno-sibirskaya-zheleznaya-doroga.jpg>

<sup>19</sup> Зимой замерзают болота, меньше слякоти и непролазной грязи, в которой техника вязнет и не может добраться до мест добычи сырья.

<sup>20</sup> Отметим, что данные с биржи лишь показывают объем совершенных сделок, но и отсюда уже можно сделать те же выводы.

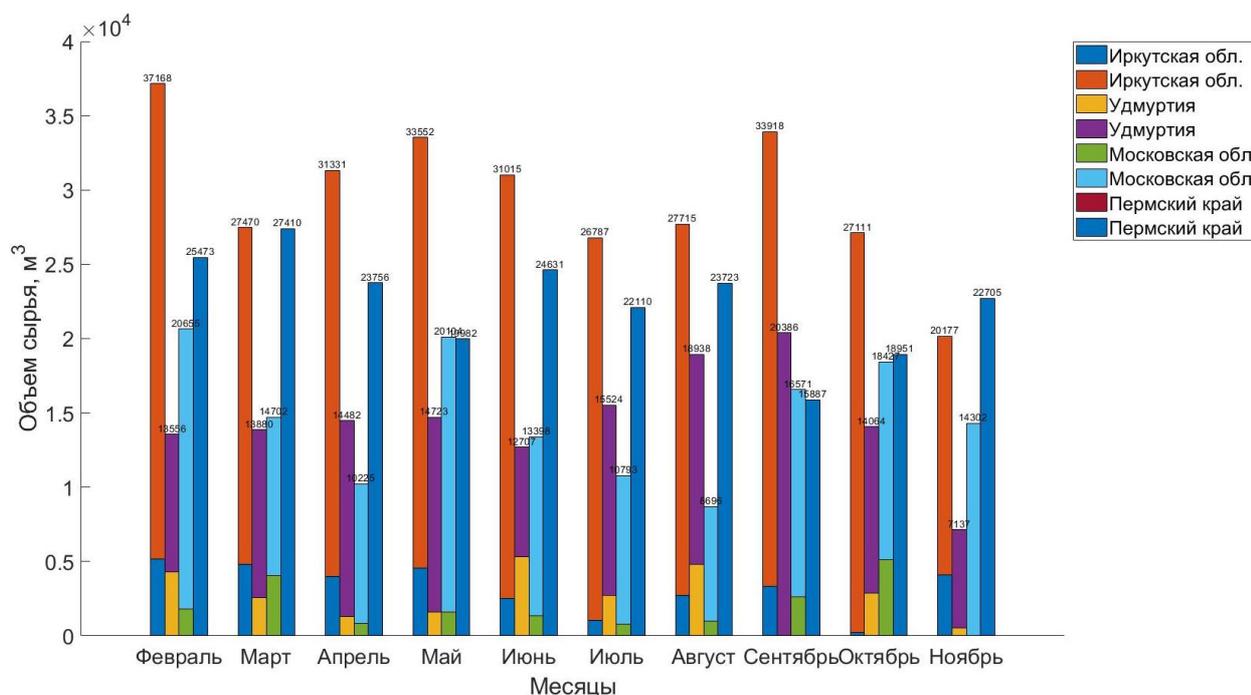


Рисунок 7 – Визуализация объемов первого типа сырья, продаваемое на бирже в каждом регионе по месяцам

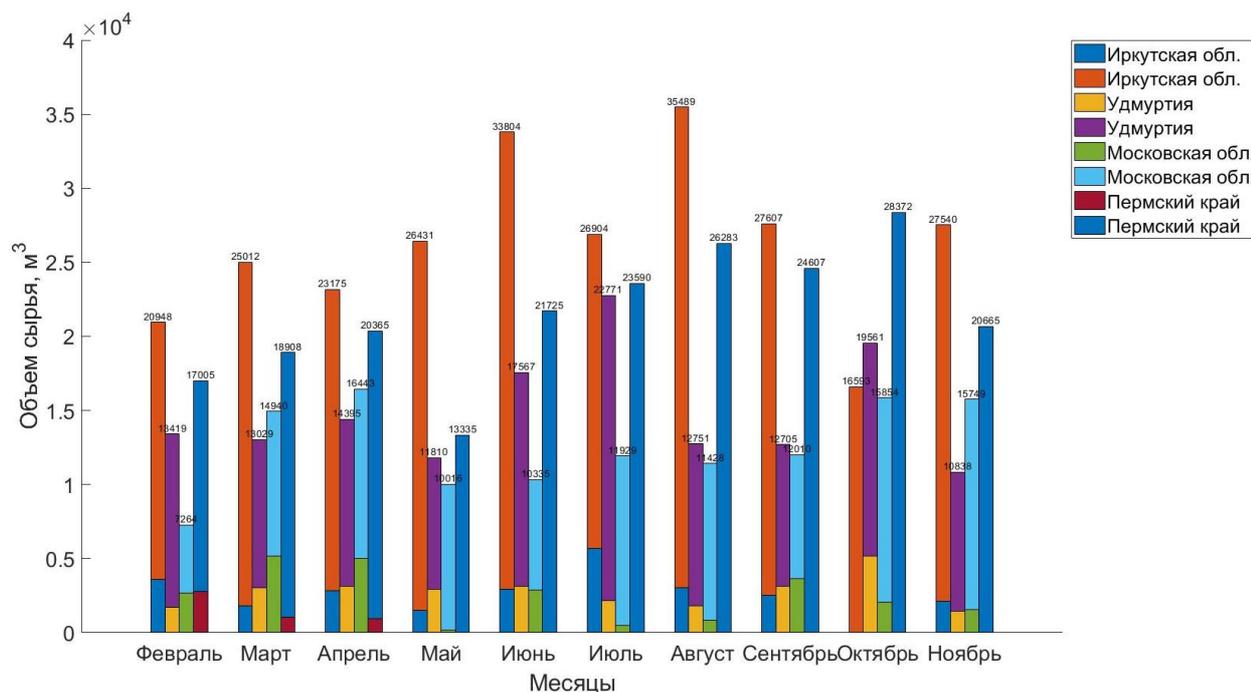


Рисунок 8 – Визуализация объемов первого типа сырья, продаваемое на бирже в каждом регионе по месяцам

Рассмотрим возможности по модернизации модели.

Следует отметить, что в процессе доставки сырья до потребителя в лесной отрасли есть особенность, заключающаяся в том, что предприятие часто отказывается от сырья, если последнее находится в пути достаточно долго (больше, чем указано в договоре купли-продажи). Это связано с потерей сырьем качества, необходимого по технологии для производственного процесса. Для моделирования данной особенности необходима модификация модели, которая может быть получена путем введения в модель вероятностного распределения, характеризующего пройденное

каждый день расстояние по железной дороге с учётом времени года. Как известно, чем ближе к зиме, тем ниже пропускная способность по железной дороге.

В данной статье рассмотрено предприятие без наличия своих делян. Однако, стоит учитывать, что предприятие в будущем может получить свои деляны, что также качественно скажется на ценовой и ресурсной политиках предприятия.

### **Заключение**

В работе показана актуальность проблемы исследования цепочек поставок сырья предприятия.

Построена математическая модель по формированию цепочек поставок сырья с учетом следующих факторов: норм затрат сырья на производство каждой единицы продукции, минимального и максимального объема сырья на складе, времени доставки на склад, спроса на рынке на товары, изменения цены на товары предприятия во времени, максимальной вместимости склада во времени, изменение спроса во времени, изменения постоянных издержек во времени. Цель модели – получение максимума прибыли. Выбран и обоснован алгоритм по поиску оптимального/эффективного решения.

Модель была протестирована на базе данных предприятия ООО «ДНС-Лес», Санкт-Петербургской Международной Товарно-сырьевой Биржи с учетом многолетнего опыта работы по реализации товаров собственного производства ООО «Лесозаводский ЛПК». Анализ данных показал, во-первых, положительные перспективы и тренды работы с товарно-сырьевой биржей, во-вторых, эффективность разработанной модели, в-третьих, эффективное соотношение производимых товаров, в-четвертых, качественную прогнозируемость поведение прибыли предприятия.

Данная модель может быть модифицирована путем введения вероятностных экономико-производственных ограничений, среди которых отметим следующие: во-первых, вероятность отказа от продукции, если последние идет дольше, чем это оговорено в договоре купли-продажи, во-вторых, вероятность прохождения расстояния по ЖД линиям купленного сырья, в-третьих, вероятность получения арендованного участка по добыче сырья (деляны).

В конце работы считаем необходимым добавить, что работа с товарно-сырьевой биржей в России носит положительный характер и может быть рекомендована к работе каждого предприятия, у которого нет своих делян.

### **Список литературы**

1. Amiri. A., (2006). designing a distribution network in a supply chain system: formulation and efficient solution procedure, Eur. J. Oper. Res. 171, 567– 576.
2. Gebennini. E., Gamberini. R., Manzini. R., (2009). An integrated production–distribution model for the dynamic location and allocation problem with safety stock optimization, Int. J. Prod. Econ. 122,286–304.
3. Konak.A., Coit.D.W., Smith.A.E., (2006). Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial, Reliability Engineering and System Safety 91, 992–1007.
4. Rahimikelarijani, B., Saidi-Mehrabad, M., Barzinpour, F. (2020). 'A Mathematical Model for Multiple-Load AGVs in Tandem Layout', Journal of Optimization in Industrial Engineering, 13(1), pp. 67-80. doi: 10.22094/joie.2018.537.37

5. Talatahari, S., Goodarzimehr, V., Taghizadieh, N. (2020). 'Hybrid Teaching-Learning-Based Optimization and Harmony Search for Optimum Design of Space Trusses', *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 13(1), pp. 177-194. doi: 10.22094/joie.2019.1866904.1649
6. Samadi, M., Nouraei, M., Mozaffari, M., Haji Karimi, B. (2020). 'Optimal Localization of Shopping Centers Using Metaheuristic Genetic Algorithm', *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 13(1), pp. 167-176. doi: 10.22094/joie.2019.363.0
7. Fran Ackermann, Colin Eden. 2020. Strategic Options Development and Analysis. *Systems Approaches to Making Change: A Practical Guide*, pages 139-199.
8. Scavarda, L.F., Reichhart, A., Hamacher, S., Holweg, M., (2010). Managing product variety in emerging markets. *Int. J. Oper. Prod. Manag.* 30 (2), 205–224.
9. Billal, M., Hossain, M. (2020). 'Multi-Objective Optimization for Multi-Product Multi-Period Four Echelon Supply Chain Problems Under Uncertainty', *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 13(1), pp. 1-17. doi: 10.22094/joie.2018.555578.1529
10. Ren, J., Tan, S., Yang, L., Goodsite, M.E., Pang, C., & Dong, L. (2015), Optimization of energy sustainability index for bio diesel supply network design. *Energy Conversion and Management*, 92, 312–321.
11. Cardona-Valdés, Y., Alvarez, A., Ozdemir, D., (2011). A bi-objective supply chain design problem with uncertainty, *Transp. Res. Part C* 19, 821–832.
12. El-Sayed, M., Afia, N., El-Kharbotly, A., (2010). A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk, *Computer & Industrial Engineering* 58, 423–431.
13. Schut, P.Z., Tomasgard, A., Ahmed, S., (2009), Supply chain design under uncertainty using sample average approximation and dual decomposition, *Eur. J. Oper. Res.* 199, 409–419.
14. Chen, C.L., Wen, W.C., (2004). Multi-objective optimization of multi-echelon supply chain networks with uncertain product demands and prices, *Computers and Chemical Engineering* 28, 1131–1144.
15. Georgiadis, M.C., Tsiakis, P., Longinidis, P., M.K. Sofioglou, (2011). Optimal design of supply chain networks under uncertain transient demand variations, *Omega*. 39, 254–272
16. Wang, K.J., Makond, B., Liu, S.Y., (2011). Location and allocation decisions in a two-echelon supply chain with stochastic demand – a genetic-algorithm based solution, *Expert Syst. Appl.* 38, 6125–6131.
17. Olivares-Benitez, E., González-Velarde, J.L., RíosMercado, R.Z., (2012), A supply chain design problem with facility location and bi-objective transportation choices, *Sociedad de Estadística e Investigación Operativa* 20, 729–753.
18. Guoquan Zhang, G., Shang, J., Li, L., (2011). Collaborative production planning of supply chain under price and demand uncertainty, *Eur. J. of Oper. Res.* 215, 590–603.
19. Pishvaei, M.S., Farahani, R.Z., Dullaert, W., (2010). A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design, *Comput. Oper. Res.* 37 (6), 1100–1112.
20. Easwaran, G., Üster, H., (2010), A closed-loop supply chain network design problem with integrated forward and reverse channel decisions, *IIE Trans.* 42, 779–792.

21. Mehrbod. M., Tu.N., Miao.L., Dai. W., (2012). Interactive fuzzy goal programming for a multiobjective closed-loop logistics network, *Annals Oper. Res.* 201, 367–381.
22. Lu. Z., Bostel.N., (2007). A facility location model for logistics systems including reverse flows: the case of remanufacturing activities, *Comput. Oper. Res.* 34, 299–323.
23. Ruiz-Femenia. R., Guillén-Gosálbez. G., Jiménez L., Caballero. J.A., (2013). Multi-objective optimization of environmentally conscious chemical supply chains under demand uncertainty, *Chem. Eng. Sci.* 96, 1–11.
24. Rodriguez. M.A., Vecchietti. A.R., Harjunkski. L., Grossmann. L.E., (2014). Optimal supply chain design and management over a multi-period horizon under demand uncertainty. Part I: MINLP and MILP models, *Comput. Chem. Eng.* 62, 194–210
25. Shankar, B, L., Basavarajappa, S., Chen, J, C, H., Kadadevaramath, R, S., (2013). Location and allocation decisions for multi-echelon supply chain network—A multi-objective evolutionary approach. *Expert Syst. with Applications.* 40, 551–562.
26. Sarrafha, K., Rahmati, S, H, A., Niaki, S, T, A., Zaretalab, A., (2014). A bi-objective integrated procurement, production and distribution problem of a multiechelon supply chain network design: A new tuned MOEA. *Comput. & Oper. Research.* 54, 35–51.
27. Pasandideh.S.H.R., Niaki. S. T A., Asadi.K., (2015). Optimizing a bi-objective multi-product multiperiod three echelon supply chain network with warehouse reliability, *Expert Systems with Applications* 42, 2615–2623.
28. Amin S.H., Zhang. G., (2013), A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return, *Appl. Math. Model.* 37, 4165–4176.
29. Pishvae, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2014). An accelerated Benders decomposition algorithm for sustainable supply chain network design under uncertainty: A case study of medical needle and syringe supply chain. *Transportation Research Part E: Logist. and Transport. Review*, 67, 14–38.
30. Kannan. D., Khodaverdi. R., Olfat. L., Jafarian. A., Diabat. A.I., (2013). Integrated fuzzy multi criteria decision making method and multi-objective programming approach for supplier selection and order allocation in a green supply chain, *J. Clean. Prod.* 47, 355–367.
31. Pasandideh, S. H. R., Niaki, S. T. A., & Asadi, (2015). K. Bi-objective optimization of a multi-product multi-period three-echelon supply chain problem under uncertain environments: NSGA-II and NPGA. *Information Sciences*, 292, 57–74
32. Ren,J., Tan,S., Yang,L., Goodsite, M.E., Pang,C., & Dong,L. (2015), Optimization of emergy sustainability index for bio diesel supply network design. *Energy Conversion and Management*, 92, 312–321.
33. Fung,J., Singh,G., & Zinder,Y. (2015). Capacity planning in supply chains of mineral resources. *Information Sciences*, 316 397–418.
34. Camacho-Vallejo, J. F., Munoz-Sanchez,R., & LuisGonzalez-Velarde,J., (2015). A heuristic algorithm for a supply chain's productiondistribution planning. *Comput. & Operations Research*, 6,110–121.
35. Ulungu. E.L., Teghaem. J., Fortemps. P., Tuyttens. D., (1999). MOSA method: a tool for solving multiobjective combinatorial decision problems, *J. Multi-criteria Decis. Anal.* 8, 221–236.
36. Altiparmak. F., Gen. M., Lin. L., Paksoy. T., (2006) . A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks, *Comput. Ind. Eng.* 51, 196–215.

37. Hnaiena. F., Delorme. X., Dolgui. A., (2010). Multiobjective optimization for inventory control in two-level assembly systems under uncertainty of lead times, *Comput. Oper. Res.* 37, 1835–1843.
38. Prakash. A., Chan. F.T.S., Liao. H., Deshmukh. S.G., (2012). Network optimization in supply chain: a KBGA approach, *Decis. Support Syst.* 52, 528–538.
39. Shi.S., Liu.Z., Tang.L., Xiong.J., (2017). Multi-objective optimization for a closed-loop network design problem using an improved genetic algorithm, *Appl. Mathe. Modeling* 45, 14–30.
40. Rabiee. M., Zandieh . M., Ramezani. P., (2012). Biobjective partial flexible job shop scheduling problem: NSGA-II, NPGA, MOGA and PAES approaches, *Int. J. Prod. Res.* 50 (24),7327–7342.
41. Marufuzzaman. M., Eksioglu. S.D., Huang. Y., (2014). Two-stage stochastic programming supply chain model for biodiesel production via wastewater treatment, *Comput. Oper. Res.* 49, 1–17.
42. Srinivas N, Deb K. (1994) Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *J Evol Comput*, 2 (3), 221–48.
43. Bandyopadhyay. S., Bhattacharya. R., (2014). Solving a tri-objective supply chain problem with modified NSGA-II algorithm, *J. Manuf. Syst.* 33, 41–50.

1) Рогулин Родион Сергеевич;

2) -;

3) Кафедра Математики и моделирования, Владивостокский  
Государственный Университет Экономики и Сервиса;

4) ассистент;

5) ул. Гоголя 41, г. Владивосток, Приморский край;

6) 690089, ул. Героев Варяга 10а, г. Владивосток, Приморский край;

7) rafassiaofusa@mail.ru;

8) 89089935659;

9) SPIN-код – 4125-0948.

10) ORCID: 0000-0002-3235-6429