




## Моделирование перспектив взаимодействия предприятия лесопромышленного комплекса и товарно-сырьевой биржи России

Р. С. Рогулин  

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса,  
г. Владивосток, Россия  
 rafassiaofusa@mail.ru

**Аннотация.** Актуальность исследования заключается в отсутствии работ в литературе, посвященных формированию цепочек поставок сырья в достаточных для производства объемах с применением аппарата товарно-сырьевых бирж. Целью работы является проведение эмпирического исследования по оценке целесообразности взаимодействия лесопромышленного предприятия с товарно-сырьевой биржей. Для проведения исследования была разработана математическая модель по оценке целесообразности закупа сырья с лесного отдела товарно-сырьевой биржи предприятием лесопромышленной отрасли. Гипотеза заключается в том, что взаимодействие лесопромышленного комплекса с биржей может быть выгодным для предприятия. Для проведения анализа целесообразности проведения закупок сырья с биржи 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 доказательстве целесообразности закупа предприятием сырья с товарно-сырьевой биржи России. Теоретическая значимость исследования заключается в разработке новой модели по оценке целесообразности проведения закупок сырья с применением аппарата биржи. Научная новизна заключается в построенной математической модели формирования цепочек поставок и объемов производства с учетом спроса на рынке и доступных объемов сырья. Апробация модели проведена 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 целесообразности 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.

### 1. Введение

В настоящее время в центре внимания многих исследователей находится управление цепочками поставок (Supply

Chain Management, далее – SCM), которое охватывает планирование производством всей цепочки поставок от поставщика сырья до конечного потребителя.

Существует большое количество подходов из области менеджмента для оптимизации процессов формирования цепочек поставок сырья, однако ввиду случайности многих процессов эти подходы не всегда могут дать достаточно точное понимание того, как будет себя вести показатель прибыли или др. экономические параметры, которые очень важны при принятии решений. Для ответа на вопрос о выгодности и целесообразности работы предприятия или взаимодействия его с другими агентами на рынке принято моделировать процессы работы предприятия исходя из разных внешних предпосылок и внутренних производственных условий.

В XXI веке SCM стал основой управления предприятием, но 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 самостоятельной областью для исследования. В большинстве классических схем цепочек поставок цель состояла в том, чтобы отправлять продукты с одного уровня на другой для удовлетворения потребностей, чтобы сумма стратегических, тактических и/или эксплуатационных расходов была минимальной. Так, Amiri разработал двухэтапную модель формирования цепочек поставок (Supply Chain, далее SC), чтобы выбрать оптимальное местоположение производственных предприятий и распределительных складов, чтобы отгружать продукцию с заводов потребителям с целью минимизации общих затрат распределительной сети [1]. 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 необходимо минимизировать затраты, минимизировать риски, максимизировать производительность, максимизировать надежность сети и т. д.

Это сложные, но реалистичные проблемы [4]. Деятельность многоцелевых задач 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 всем целям на приемлемом уровне [6]. При многоцелевой оптимизации сложно получить единственное оптимальное решение, которое бы гарантировало всем целевым функциям оптимальное значение.

Таким образом, многоцелевая оптимизация заключается не в поиске *оптимального* решения, а в поиске *эффективного* решения, которое доставит минимум (максимум) значениям целевых функций или обеспечит наилучшее приемлемое соотношение оптимизируемых величин.

*Целью исследования* является формирование и разработка экономико-математической модели по оценке целесообразности взаимодействия предприятия в долгосрочной перспективе с товарно-сырьевой биржей на аукционных торгах.

Выдвигаются следующие *задачи* для достижения цели исследования:

- разработать модель, позволяющую максимизировать доналоговую прибыль предприятия на основе: изменения цен и спроса на конечную продукцию в определенных границах, изменения норм объемов сырья потребных для производства каждой единицы

продукции, оптимизировать планирование закупок сырья с биржи и объемов производства с использованием уже реализованных заявок на товарно-сырьевой бирже за прошедший период;

– апробировать модель в условиях реального предприятия и исследовать вычислительные аспекты применения модели;

– провести экономический анализ полученных результатов в ходе работы модели и дать оценку целесообразности работы предприятия с биржей.

Сформулируем *гипотезу исследования* исходя из цели и задач исследования: взаимодействие предприятия с товарно-сырьевой биржей России должно носить выгодный характер.

## 2. Обзор литературы

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, розничных продавцов и даже самих покупателей [7]. Цепочка поставок – 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.

В последнее время большое значение приобретает проектирование цепочек поставок в условиях неопределенности спроса [8, 9]. Авторы работы [10] разработали модель смешанно-целочисленного нелинейного программирования (MINLP), чтобы помочь заинтересованным сторонам/лицам, принимающим решения, найти наиболее удачную архитектуру сети в неустойчивой сложившейся среде. Например, предложена биобъективная

двухэшелонная производственная распределительная сеть в условиях неопределенности спроса, целью которой является минимизация как общей стоимости цепочки поставок, так и общее время обслуживания [11]. Авторы решили проблему стохастической оптимизации с помощью L-образного алгоритма. Авторы [12] расширили многопериодную трехэшелонную логистическую сеть прямого и обратного хода в условиях неопределенностей. Они рассмотрели три эшелона в прямом направлении и два эшелона в обратном направлении, чтобы максимизировать общую ожидаемую прибыль.

Сформулирована двухэтапная стохастическая модель класса SC в рамках краткосрочных операций и неопределенности спроса, целью которой является минимизация общих ожидаемых затрат на поставку [13]. 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 отражают реалистичную ситуацию для любого вида продукции и услуг, поскольку эта неопределенность является обычным явлением в оценке стоимости цепочек поставок.

Авторы 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 [15]. Авторы работы 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) [16]. Olivares-Benitez сформулировал новую бицелевую смешанно-целочисленную задачу SC, которую решил тремя классическими методами и получил оптимальные по Парето точки для принятия решений [17].

Коллектив авторов предложил сеть цепочек поставок многоэшелонированной производственно-транспортной системы, которая включает в себя поставку материалов, изготовление промежуточных компонентов, производство конечных видов товаров и распределение продукции в условиях неопределенности цен и спроса [18]. Авторы работы предложили двухцелевую смешанно-целочисленную модель (Mixed-Integer linear Programming, далее MILP), чтобы минимизировать общие затраты SC и максимизировать отзывчивость логистической сети с замкнутым контуром [19]. Для достижения цели использовался меметический алгоритм. Также авторы разработали алгоритм динамического поиска для решения этой проблемы. Авторы вычислили проблему проектирования замкнутой логистической сети, состоящей из нескольких продуктов, в которой рассматриваются гибридные производственные/восстановительные мощности и гибридные распределительные/сборочные центры [20]. Эта проблема была решена методом разложения Бендера. Mehrbod M., Tu N., Miao L., Dai W. разработали многоцелевую модель MILP, чтобы минимизировать общую стоимость SC, время доставки и время сбора использованных продуктов в замкнутой сети [21].

Авторы работы [22] представили двухуровневую задачу определения местоположения, в которой прямые и обратные потоки рассматриваются

одновременно, а для решения этой проблемы была разработана модификация эвристики Лагранжа [23]. Также был проведен анализ влияния неопределенности спроса на многоцелевую оптимизацию цепочек поставок химических веществ, одновременно рассматривая их экономические и экологические показатели. Коллектив авторов предложил модель оптимизации для перепроектирования цепочки поставок запасных частей в условиях неопределенности спроса со стратегической и с тактической точек зрения на горизонте планирования, состоящем из нескольких периодов [24]. Они учитывали эффект объединения рисков, который учитывался при определении уровня запасов в распределительных центрах и в клиентских зонах.

Существуют многочисленные методы поиска решения многоцелевой оптимизации, которые обсуждаются в различной литературе, например [25]. В этой работе проведена многоцелевая оптимизация для решения задачи формирования цепочек поставок с четырьмя эшелонами, чтобы уменьшить общую стоимость цепочек поставок, а также максимизировать скорость заполнения. Авторы использовали алгоритм MOPSO, который может быть применен более чем для двух разнонаправленных и не соразмеряемых целей одновременно в условиях неопределенности. Разработана многопериодная модель для проектирования сети цепочек поставок нескольких продуктов, чтобы снизить общие затраты цепочек поставок и среднее опоздание продукта в распределительные центры, используя новый многоцелевой метод, созданный на основе алгоритма MOVBBO [26]. Предложена двухцелевая модель MILP для многоэтапной сети цепочек поставок, в которой авторы использовали шесть модификаций метода MODM,

чтобы снизить общую стоимость и повысить скорость реагирования [27].

Предлагается совместное решение для цепочки поставок, состоящей из трех игроков: производителя, дистрибьютора и розничного продавца [29]. Как известно, стоимость хранения увеличивается с течением времени, и товар может терять до 100% своей полезности. Чтобы учесть эти два фактора, добавлены зависящие от времени затраты на хранение и износ. В этой статье рассматривается модель инвентаризации цепочки поставок с учетом постоянного ухудшения отгрузок между игроками, времени пополнения запасов и спроса на последующий период кредитования. Кроме того, дистрибьютор предоставляет розничному продавцу торговый кредит для увеличения его спроса. Авторы отмечают, что их исследование имеет несколько путей для модификации, например предложенная модель инвентаризации может быть дополнительно обобщена, допуская дефицит и множественные позиции, может быть проанализирована в ситуации многоуровневой цепочки поставок и может быть также расширена для стохастического спроса, зависящего от времени и упущенных объемов продаж.

Рассматривалось управление цепочкой поставок с распределенным местоположением [30]. Была предложена многопериодная многопродуктовая модель. Также были отмечены экологические и социальные аспекты, помимо денежных перспектив, которые помогают пользователю создать устойчивую распределительную сеть. Были рассмотрены различные уровни технологий для автопарка и разные объемы выбросов CO<sub>2</sub> для каждого потенциального местоположения объектов с целью включения экологического фактора в предлагаемую модель. Кроме того, был отмечен обратный заказ товаров, приводящий

к неудовлетворенности покупателей, и учтены разные приоритеты покупателей. Таким образом, при вычислении обратного заказа продуктов для каждого покупателя с определенной степенью важности в модели учитывается социальная перспектива. Чтобы преодолеть хаотичный и неопределенный характер некоторых параметров (включая спрос клиентов, транспортные расходы и выбросы CO<sub>2</sub> при транспортировке продуктов), был использован новый подход к неопределенности, названный Hybrid Robust Possibilistic Programming II (HRPP-II). Решения носят Парето оптимальный характер.

В исследовании изучалась задача одноэтапного определения размера партии для несовершенной производственной системы [31]. В этой системе предполагалось, что какой-то процент производимых товаров имеет дефект и требует доработки. Процесс доработки мог начаться после обычного производственного процесса или после того, как запас идеальных предметов был нулевым. Кроме того, в некоторых производственных машинах для доработки требуется время на настройку машины. Поэтому авторы представили агрегированную модель для двух разных политик: немедленная переработка и отложенная переработка. Первая политика заключалась в определении размера партии дефектной производственной системы с ненулевым временем настройки для немедленной доработки. Вторая политика заключалась в определении размера партии дефектной производственной системы с ненулевым временем наладки для отложенной доработки. Авторы также изучили частные случаи, связанные с двумя моделями, в которых время настройки равно нулю. Целью этого подхода было определение оптимальной производственной политики для минимизации общих затрат, которые

включают стоимость настройки, стоимость производства, стоимость доработки, стоимость хранения совершенных элементов и стоимость хранения повторно обрабатываемых элементов. В этом исследовании была предложена общая процедура точного решения. Некоторые примеры были решены по предложенной методике. Затем был получен оптимальный объем производства согласно каждой политики (немедленная и отложенная доработка). Наконец, окончательное решение системы было принято путем оценки реакции каждой политики.

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

1. Оценку эффективности какого-либо варианта работы предприятия лесной направленности с товарно-сырьевыми биржами в рамках аукционных торгов.

2. Оценку эффективности 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. Методология исследования**

#### ***3.1. Модель формирования оптимальных планов закупок сырья и выпуска конечных видов продукции***

Рассмотрим возможности предприятия по получению сырья. Всего можно указать три таких варианта.

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, т. к. стратегия работы предприятий при первых двух хорошо известна и проработана в литературе<sup>1</sup>.

Таким образом, рассматривается задача формирования оптимальных планов закупки сырья и выпуска продукции производственной компании лесной отрасли на заданном горизонте планирования  $M$  с учетом, 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 задается регионом лесодобывающей компании, объемом и ценой, включающей стоимость доставки. Спрос на рынке готовой продукции задается возможной ценой продажи для каждого вида продукции. В качестве целевой функции положим максимизацию накопленной прибыли.

Для того чтобы провести оценку целесообразности ведения закупа сырья предприятием с биржи на любой срок, необходимо провести достаточно большое количество итераций, а для ускорения поиска решения будем искать их с применением аппарата параллельного программирования.

<sup>1</sup>См. примеры таких работ [1–20, 23].

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  $m$ -й день (руб.), включая стоимость доставки;

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

$\dot{V}_{ilrm}$  – покупаемый объем сырья типа  $l$  из заявки  $i$  из региона  $r$  в день  $m$  (м<sup>3</sup>);

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

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

$\dot{V}_{ilrm}$  – объемы сырья типа  $l$ , купленные в предыдущем периоде, про которые известно, что они поступят на склад в день  $m$  (м<sup>3</sup>);

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

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

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

$\text{iter}$  – количество независимых итераций (ед.);

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

$x_{km}$  – объем производства товаров типа  $k$  в день  $m$  (шт.);

$I$  – количество заявок, которые были куплены в предыдущий период (до  $m=0$ ) 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  $m$ ;

$\dot{Q}_{nkm}$  – 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  $u_0$ ,  $Budget_0$  задаются и соответствуют последнему дню предыдущего периода;

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

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

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

В качестве целевой функции будем рассматривать показатель доналоговой прибыли (далее – прибыли) предприятия на заданном горизонте планирования  $M$ . Имеется в виду использовать значения прибыли до уплаты налогов. Распространенной чертой российского бизнеса (лесопромышленная отрасль не исключение) сегодня является ведение «черной бухгалтерии» [28]. Такая форма учета на предприятиях лесопромышленной отрасли сложилась в значительной мере по исторической причине, когда во времена переходного периода от плановой экономики к рыночной во главе бывших леспромхозов оказывались личности с судимостью, которые не желали и не желают по понятным причинам делиться прибылью с государством. В связи с этим в модели будем использовать значение доналоговой прибыли.

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

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

Ограничение (1) – целевая функция, отражающая суммарную прибыль производства, (2) отражает рекуррентное соотношение объема каждого вида сырья каждый день в зависимости от периода планирования.

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

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

Ограничения (3)–(4) гарантируют наличие сырья на складе в пределах между минимальным запасом и максимальной вместимостью на складе.

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

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

Ограничение (5) утверждает, что суммарное количество затраченного каждого вида ресурса не превысит запаса соответствующего типа сырья на складе в день  $m$ . (6) утверждает минимальный объем бюджета в день  $m^*$ .

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

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

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

$$u_{l_0} = const. \quad (10)$$

(7) ограничивает объем производства спросом на рынке. (8) задает верхние и нижние пределы объемов покупки сырья. (9)–(10) – входные данные.

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

Ограничение (11) гарантирует целочисленность полученного решения. Отметим, что перед вычислением оптимальных значений модели (1)–(11) вычисляются (13)–(17).

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

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

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

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

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

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

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  $n$ ;  $\alpha^g, \beta^g \geq 0, g = 1: 5$ ;  $\alpha^g, \beta^g \in Z^+, g = 2: 4$ .

Рассмотрим ограничения (12)–(17) подробнее. (12) при поиске оптимального решения не участвует, поэтому (12) вычисляется после найденного оптимального решения модели (1)–(11). Серия ограничений (13)–(17) вычисляется на момент начала работы имитации. Ограничение типа (13) призвано с целью отразить изменение цены во времени. Ограничение (14) отражает изменение технологической матрицы. Ограничение (15) отождествляет изменение предельного объема сырья на складе. Ограничение (16) утверждает изменение спроса на основе данных предприятия за 2019 год.



Ограничение (17) отражает объем постоянных издержек на предприятии для каждой итерации.

Заметим, что в данной модели используется *прямая цепь поставок*<sup>2</sup>, которая состоит из двух участников: поставщика и покупателя (потребителя).

Задача (1)–(11) представляет собой задачу МИЛР. Рассмотрим ее особенности. Первое – количество переменных растет с высокой скоростью. Второе – количество ограничений с высокой вероятностью накладывает серьезную сложность на поиск первого допустимого решения, т. к. может резко расти полиэдральное допустимое множество решений.

Имеется в виду:  $\sum_n Q_{nkm}$ . Если послед-

нее слишком большие принимает значения, то алгоритму сложно осуществлять поиск допустимого или оптимального решения (см. дополнительно [1, 8, 29]). Третье – поиск целочисленного решения. Четвертое – количество независимых итераций.

Для учета первых трех особенностей будем использовать смешанный алгоритм Гоморри и Ветвей и границ<sup>3</sup>, позволяющий максимально быстро находить допустимое решение, осуществлять максимально эффективно поиск оптимального/эффективного решения. Суть алгоритма заключается в отсечении от допустимого множества решений меньшего множества путем введения в систему (1)–(11) дополнительных фиктивных ограничений (гиперплоскостей) так, чтобы на пересечении гиперплоскостей из оригинальной системы ограничений и гиперплоскостей дополнительных ограничений находились

<sup>2</sup>Подробнее см. [http://elar.ufrfu.ru/bitstream/10995/59184/1/978-5-7996-2269-5\\_2018.pdf](http://elar.ufrfu.ru/bitstream/10995/59184/1/978-5-7996-2269-5_2018.pdf).

<sup>3</sup>MathWorks. Documentation. Intlinprog [Электронный ресурс]. <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html>

точки – симплексы, координаты которых были бы целочисленны. Следующий этап алгоритма заключается в поиске оптимального решения на полученном «целочисленном» множестве. Для этого, например, уже можно воспользоваться классическим Симплекс-методом.

### 3.2. 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 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 целесообразности взаимодействия его с Санкт-Петербургской международной товарно-сырьевой биржей<sup>4</sup> (далее – биржа). В качестве видов сырья предприятие интересуют 2 основных вида: 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.

Процесс закупа описывается довольно тривиально. Покупатель размещает ставку на не превосходящий объем сырья в заявке продавца и ждет ответа в течение короткого времени. Далее, в случае победы в торгах, покупатель может запросить у продавца транспортное плечо для доставки купленного лота до склада покупателя. В нашей же

<sup>4</sup>Официальный сайт Санкт-Петербургской международной товарно-сырьевой биржи (АО «СПбМТСБ») [Электронный ресурс]. <https://spimex.com/markets/wood/trades/results/>

работе мы сосредоточимся на итогах торгов, чтобы провести верхнюю оценку целесообразности работы предприятия с биржей.

Для тестирования модели воспользуемся данными с биржи за 11 месяцев (с 01 февраль 2019 года по 30 ноября 2019 года) или за 302 дня ( $M$ ), суммарно по всем видам сырья 1649 заявок. Согласно, данным биржи за это время в работе участвовали предприятия по лесозаготовке из 4 регионов в качестве продавцов сырья: Иркутская область (1), Республика Удмуртия (2), Московская область (3), Пермский край (4). Так как 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 ( $p_{km}$ ), 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 табл. 1 и 2.

Предприятие ДНС достаточно молодое, т. к. ведет производство лишь с января 2019 года, то по понятным причинам статистических данных для оценки значений векторов  $\varepsilon$  у нее недостаточно. Поэтому воспользуемся данными предприятия, которое занимается более 20 лет производством и добычей сырья на рынке Приморского края и за границей<sup>5</sup>. Эти данные отражены в табл. 3.

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

Рассмотрим инструментальную сторону задачи. Воспользуемся языком программирования Matlab, функцией `intlinprog`<sup>6</sup>. В качестве входных параметров положим: целевую функцию, умноженную на  $-1^5$ ; ограничение целочисленности; матрицы ограничений; векторы правых сторон для ограничений типов равенств и неравенств; нижние и верхние границы значения

<sup>5</sup>ООО «Лесозаводский ЛПК».

<sup>6</sup>`Intlinprog`. Документация. MathWorks [Электронный ресурс]. <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html>

Таблица 1. Входные начальные и постоянные данные

Table 1. Input initial and constant data

Параметр, ед. измерения	Значение параметра
$u_{max}$ , м <sup>3</sup>	7750
$u_{min}$ , м <sup>3</sup>	100
$u_{l0}^1$ , 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]
$Vud_0$ , руб	10 000 000
$FC$ , руб	1 000 000

Источники: ООО «ДНС-Лес»\*.

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

Таблица 2. Нормозатраты сырья на производство каждой единицы продукции

Table 2. Norms of raw materials for the production of each unit of production

Тип сырья ( <i>l</i> )/номер товара ( <i>k</i> )	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

Table 3. Variable parameters and their ranges

Параметр*	Значение параметра
$\epsilon_k^1$	[1–0.00095, 1+0.00075]**
$\epsilon_k^2$	[-1, 10]
$\epsilon_m^3$	[-100, 10]
$\epsilon_m^4$	[0.999, 1.001]
$\epsilon_{nkm}^5$	[-10, 10]

Источники: ООО «Лесозаводский ЛПК»

\* Все случайные величины имеют равномерное распределение.

\*\* За 11 месяцев работы планируемого периода  $p_{km} = p_{k0} \cdot \prod_k \epsilon_k^1 = p_{k0} + [-25\%, 25\%]$ .

переменных; начальную точку для поиска решения (пустой вектор); максимальное количество вершин полиэдрального множества допустимых решений, которое может пройти алгоритм (ед.). Рассмотрим последнее. Поскольку 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>7</sup>.

В качестве процессора, на котором будет проводиться численный эксперимент, был выбран AMD Ryzen 2600x<sup>8</sup> с частотой до 4,2 ГГц, с 12 потоками. Другими словами, количество параллельных вычислений составляет 12 итераций одновременно.

В качестве количества итераций положим 10000 ед. Таким образом, на каждый день приходится более 33 итераций.

<sup>7</sup> mpiSettings. Документация. MathWorks [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/parallel-computing/mpisettings.html>

<sup>8</sup> AMD Ryzen™ 5 2600X. AMD [Электронный ресурс]. URL: <https://www.amd.com/ru/products/cpu/amd-ryzen-5-2600x>

#### 4. Результаты исследования

На поиск всех *iter* единиц решений было задействовано почти два часа и более 20 Гб оперативной памяти компьютера, где последнее позволяет утверждать о высоких требованиях к аппаратуре для проведения вычислительного эксперимента. Каждое решение носит характер оптимального. Все решения получены по факту прохождения менее 90 000 вершин допустимого полиэдрального множества решений.

На рис. 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.

На рис. 2. 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 сложности планирования 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 типам сырья на склад дают возможность утверждать, что производство в среднем работает равномерно по степени интенсивности, несмотря на влияние сезонности спроса. Здесь можно также отметить, что к середине ноября поступления на склад начали восстанавливаться в своих «обычных» ритмах, но поскольку 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 *Om* можно увидеть, что тренд поступлений незначительно падает. Таким

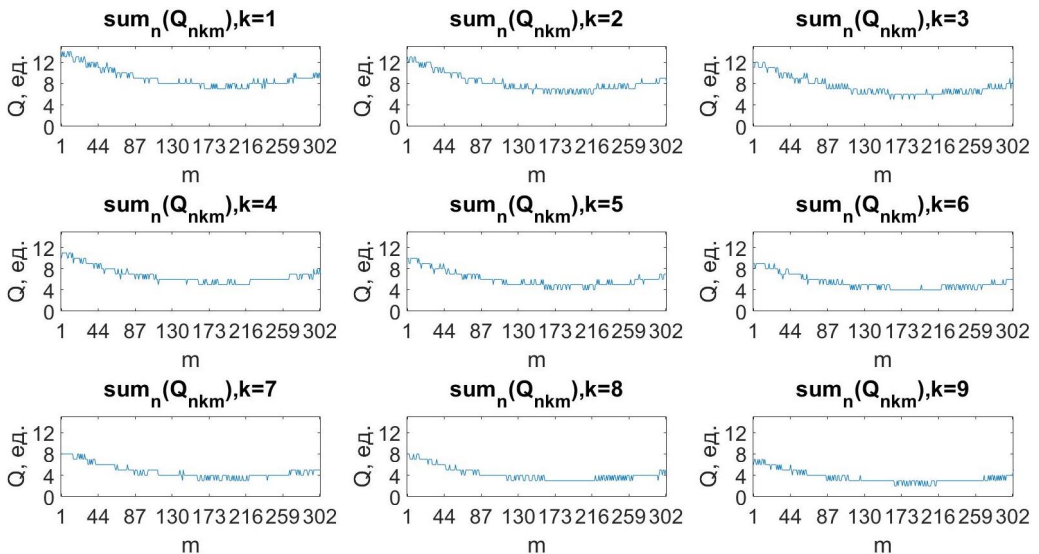
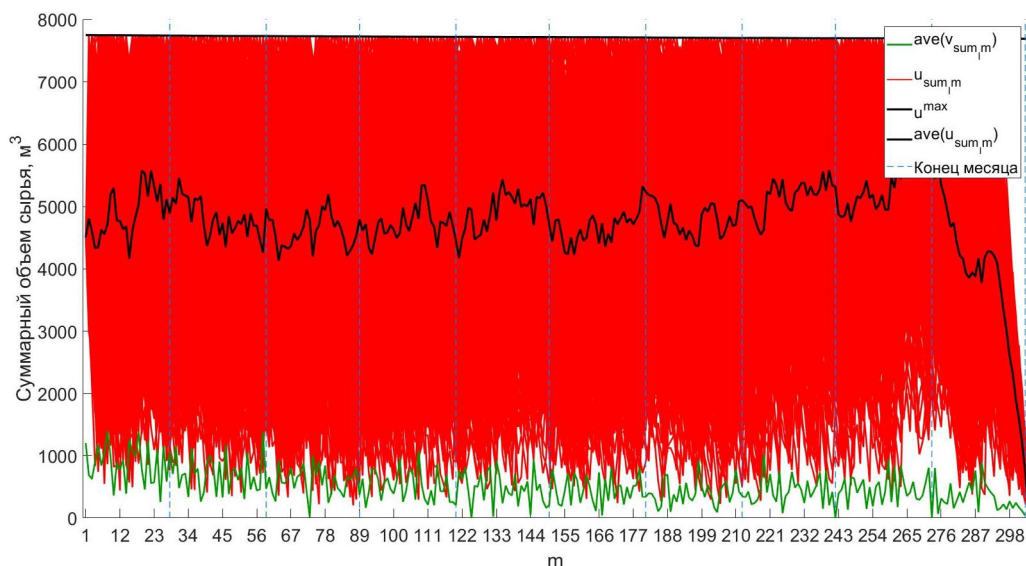


Рис. 1. Визуализация округленных средних значений  $ave\left(\sum_n Q_{nkm}\right)$

Fig. 1. Visualization of rounded mean values  $ave\left(\sum_n Q_{nkm}\right)$



**Рис. 2.** Визуализация состояния наполненности склада суммарно по всем видам сырья

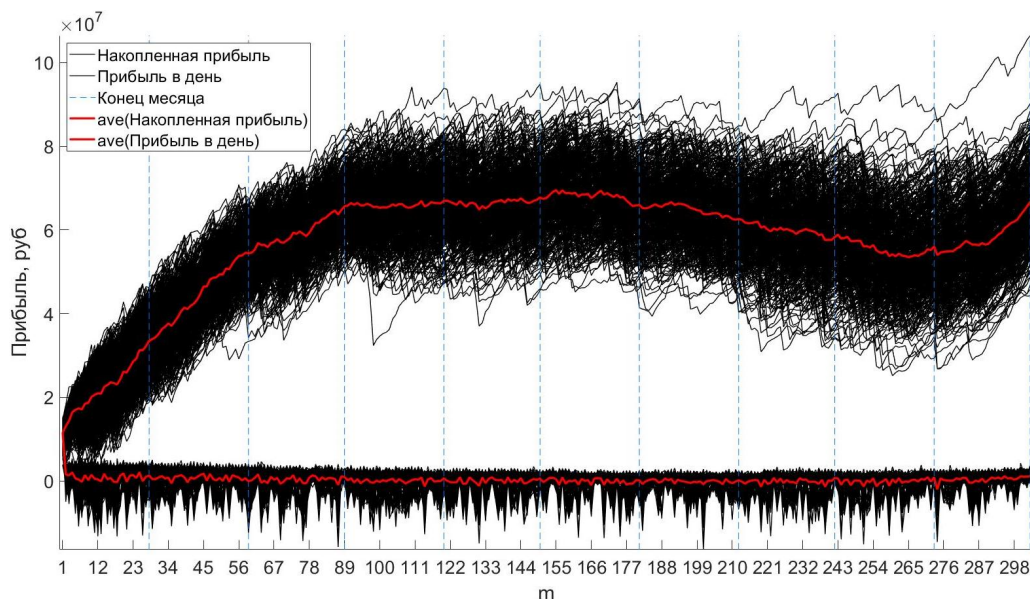
**Fig. 2.** Visualization of the warehouse fullness state in total for all types of raw materials

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.

На рис. 3 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.



**Рис. 3.** Визуализация динамики денежных средств в разрезе каждого дня

**Fig. 3.** Visualization of the dynamics of funds in the context of each day

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. 3 рассмотреть вместе с рис. 4.

На рис. 4 отражены объемы производства каждого типа товаров. Обратимся к рис. 3. 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.

На рис. 5 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.

Изображение на рисунках показывает, что наибольший объем сырья поступило из Иркутской области. Этот феномен можно объяснить тем, что Иркутская область очень давно участвует в торгах на бирже и за время работы на ней деляны уже успели ощутить все положительные стороны этого инструмента торговли, в то время как

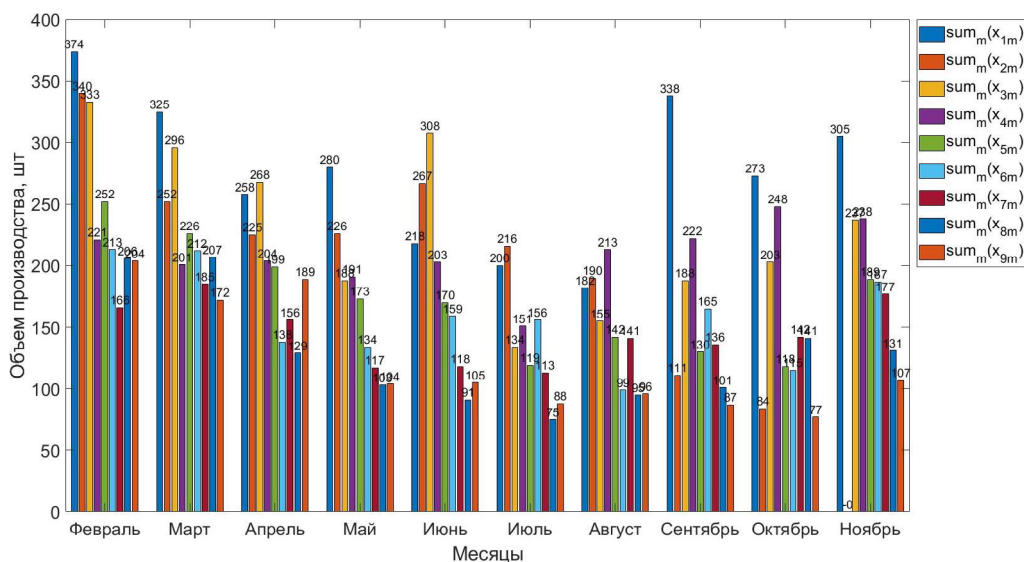


Рис. 4. Визуализация объемов производства каждого из товаров по месяцам

Fig. 4. Visualization of production volumes of each of the goods by month

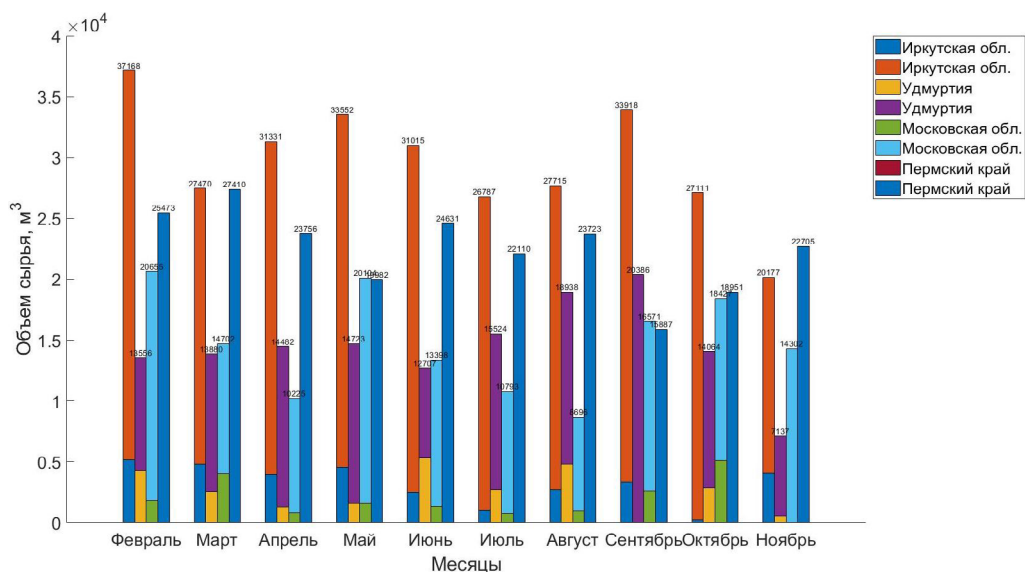


Рис. 5. Визуализация объемов первого типа сырья, продаваемого на бирже в каждом регионе по месяцам

Fig. 5. Visualization of the volumes of the first type of raw material sold on the exchange in each region by months

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 железнодорожную карту<sup>9</sup> России, а именно на Восточно-Сибирскую железную дорогу, то нетрудно заметить прямую ветку в Китай, по которой уходит сырье. Китайские предприниматели мало смотрят на цену сырья. Курс доллара и высокая инфляция в России влияют на цены на сырье, и для рядового российского бизнеса цены становятся очень высокими, при этом для китайской стороны цена может оставаться стабильной или даже падать.

<sup>9</sup>Express+. Железнодорожная карта России. Восточно-Сибирская железная дорога [Электронный ресурс]. URL: <http://www.expresstk.ru/wp-content/uploads/2017/08/Vostochno-sibirskaya-zheleznaya-doroga.jpg>

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

Результат анализа целесообразности взаимодействия предприятия лесопромышленной отрасли с товарно-сырьевой биржей носит условно положительный и продуктивный характер, что подтверждает ранее выдвинутую гипотезу. Использование приставки «условно» обозначено тем, что, как видно на рис. 3, существует интервал времени, когда значение прибыли падает, несмотря на эффективное управление производством.

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 учетом времени года. Как известно, чем ближе к зиме, тем ниже пропускная способность по железной дороге.

Авторская модель в текущем виде не учитывает степень грузонапряженности транспортных компаний, а также не является гибкой к тарифообразованию процесса перевозки. Учет этих двух факторов, несомненно, приведет к более точным результатам оценки целесообразности взаимодействия предприятия с биржей.

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

## 5. Заключение

Построена математическая модель, позволяющая формировать цепочки поставок сырья, отличающаяся, во-первых, 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, во-вторых, комплексной оптимизацией объемов закупок сырья и объемов производства из закупленного объема древесины. Целевая функция

модели направлена на извлечение максимальной прибыли. Выбран алгоритм по поиску оптимального/эффективного решения. Теоретическая значимость исследования заключается в разработке новой модели по оценке целесообразности проведения закупок сырья с биржи. Уникальность модели заключается в возможности одновременно проводить оптимизацию по двум производственным направлениям: закупу сырья и объемам производства, а также в возможности закупа сырья с лесной биржи.

Серьезными недостатками данной модели можно назвать следующие:

1. Отсутствие учета уровня грузонапряженности и отсутствие гибкости относительно тарифообразования.

2. Отсутствие учета пройденного расстояния заявкой каждый день и возможность отказа предприятием от нее в случае, если последняя в пути дольше, чем то обозначено в договоре о купле-продаже.

3. Для проведения исследования необходимо большое количество оперативной памяти компьютера.

4. Нет возможности учесть вероятность появления у предприятия собственных демян – постоянного источника сырья.

К преимуществам модели можно отнести:

1. Модель линейна и оптимизирована, с точки зрения количества ограничений, что позволяет широко использовать эвристику для решения задач большой размерности.

2. Решение может определяться параллельно, т.е. решение на следующей итерации не зависит от предыдущего. Это позволяет сократить время на проведение вычислительного эксперимента.

3. Модель оптимизирует в комплексе два важных процесса производства: объем выпуска продукции и объем закупаемой продукции с товарно-сырьевой



биржи. Комплексный учет двух факторов производства гарантирует достижение, несомненно, лучшего значения целевой функции.

4. Полученная модель позволяет вести подневный учет запасов сырья на складе.

5. Достаточно быстрая работа выбранного алгоритма по поиску оптимального решения авторской модели на достаточном объеме выборки для проведения анализа целесообразности работы предприятия с товарно-сырьевой биржей.

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, условно 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.

Предложенная модель может быть улучшена путем введения ряда (не-) линейных или/и стохастических ограничений для учета следующих экономических факторов: уровня грузонапряженности и гибкости относительно тарифообразования; пройденного расстояния заявкой каждый день и возможностей отказа предприятием от нее в случае, если последняя в пути дольше, чем то обозначено в договоре о купле-продаже; возможности учета вероятности появления у предприятия собственных делян – постоянного источника сырья.

В конце работы необходимо признать, что гипотеза о положительном характере взаимодействия предприятия с товарно-сырьевой биржей в России подтвердилась и можно смело утверждать, что если у предприятия нет своих делян, то представляется возможным пользоваться услугами товарно-сырьевой биржи России.

#### Список использованных источников

1. *Amiri A.* Designing a distribution network in a supply chain system: formulation and efficient solution procedure // *European Journal of Operational Research*. 2006. Vol. 171, Issue 2. Pp. 567–576. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.09.018.
2. *Gebennini E., Gamberini R., Manzini R.* An integrated production–distribution model for the dynamic location and allocation problem with safety stock optimization // *International Journal of Production Economics*. 2009. Vol. 122, Issue 1. Pp. 286–304. DOI: 10.1016/j.ijpe.2009.06.027.
3. *Konak A., Coit D. W., Smith A. E.* Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial // *Reliability Engineering and System Safety*. 2006. Vol. 91, Issue 9. Pp. 992–1007. DOI: 10.1016/j.res.2005.11.018.
4. *Rahimikelarjani B., Saidi-Mehrabad M., Barzinpour F.* A Mathematical Model for Multiple-Load AGVs in Tandem Layout // *Journal of Optimization in Industrial Engineering*. 2020. Vol. 13. Pp. 67–80. DOI: 10.22094/joie.2018.537.37.
5. *Talatahari S., Goodarzimehr V., Taghizadieh N.* Hybrid Teaching-Learning-Based Optimization and Harmony Search for Optimum Design of Space Trusses // *Journal of Optimization in Industrial Engineering*. 2020. Vol. 13. Pp. 177–194. DOI: 10.22094/joie.2019.1866904.1649.
6. *Samadi M., Nouraei M., Mozaffari M., Haji Karimi B.* Optimal Localization of Shopping Centers Using Metaheuristic Genetic Algorithm // *Journal of Optimization in Industrial Engineering*. 2020. Vol. 13. Pp. 167–176. DOI: 10.22094/joie.2019.363.0.

7. Ackermann F., Eden C. Strategic Options Development and Analysis // Systems Approaches to Making Change: A Practical Guide / Edited by M. Reynolds, S. Holwell. Springer, 2020. Pp. 139–199. DOI: 10.1007/978-1-84882-809-4\_4.

8. Scavarda L. F., Reichhart A., Hamacher S., Holweg M. Managing product variety in emerging markets // International Journal of Operations & Production Management. 2010. Vol. 30, Issue 2. Pp. 205–224. DOI: 10.1108/01443571011018716.

9. Billal M., Hossain M. Multi-Objective Optimization for Multi-Product Multi-Period Four Echelon Supply Chain Problems Under Uncertainty // Journal of Optimization in Industrial Engineering. 2020. Vol. 13. Pp. 1–17. DOI: 10.22094/joie.2018.555578.1529.

10. Ren J., Tan S., Yang L., Goodsite M. E., Pang C., Dong L. Optimization of emergy sustainability index for bio diesel supply network design // Energy Conversion and Management. 2015. Vol. 92. Pp. 312–321. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.12.066.

11. Cardona-Valdés Y., Alvarez A., Ozdemir D. A bi-objective supply Alvarez chain design problem with uncertainty // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2011. Vol. 19, Issue 5. Pp. 821–832. DOI: 10.1016/j.trc.2010.04.003.

12. El-Sayed M., Afia N., El-Kharbotly A. A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk // Computer & Industrial Engineering. 2010. Vol. 58, Issue 3. Pp. 423–431. DOI: 10.1016/j.cie.2008.09.040.

13. Schut P. Z., Tomasgard A., Ahmed S. Supply chain design under uncertainty using sample average approximation and dual decomposition // European Journal of Operational Research. 2009. Vol. 199, Issue 2. Pp. 409–419. DOI: 10.1016/j.ejor.2008.11.040.

14. Chen C. L., Wen W. C. Multi-objective optimization of multi-echelon supply chain networks with uncertain product demands and prices // Computers and Chemical Engineering. 2004. Vol. 28, Issue 6–7. Pp. 1131–1144. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2003.09.014.

15. Georgiadis M. C., Tsiakis P., Longinidis P., Sofioglou M. K. Optimal design of supply chain networks under uncertain transient demand variations // Omega. 2011. Vol. 39, Issue 3. Pp. 254–272. DOI: 10.1016/j.omega.2010.07.002.

16. Wang K. J., Makond B., Liu S. Y. Location and allocation decisions in a two-echelon supply chain with stochastic demand—a genetic-algorithm based solution // Expert Systems with Applications. 2011. Vol. 38, Issue 5. Pp. 6125–6131. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.11.008.

17. Olivares-Benitez E., González-Velarde J. L., RíosMercado R. Z. A supply chain design problem with facility location and bi-objective transportation choices // Sociedad de Estadística e Investigación Operativa. 2012. Vol. 20. Pp. 729–753. DOI: 10.1007/s11750-010-0162-8.

18. Guoquan Zhang G., Shang J., Li L. Collaborative production planning of supply chain under price and demand uncertainty // European Journal of Operational Research. 2011. Vol. 215, Issue 3. Pp. 590–603. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.07.007.

19. Pishvae M. S., Farahani R. Z., Dullaert W. A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design // Computers & Operations Research. 2010. Vol. 37, Issue 6. Pp. 1100–1112. DOI: 10.1016/j.cor.2009.09.018.

20. Easwaran G., Üster H. A closed-loop supply chain network design problem with integrated forward and reverse channel decisions // IEEE Transactions. 2010. Vol. 42, Issue 11. Pp. 779–792. DOI: 10.1080/0740817X.2010.504689.

21. Mehrbod M., Tu N., Miao L., Dai W. Interactive fuzzy goal programming for a multiobjective closed-loop logistics network // Annals of Operations Research. 2012. Vol. 201, Issue 1. Pp. 367–381. DOI: 10.1007/s10479-012-1192-4.

22. Lu Z., Bostel N. A facility location model for logistics systems including reverse flows: the case of remanufacturing activities // Computers & Operations Research. 2007. Vol. 34, Issue 2. Pp. 299–323. DOI: 10.1016/j.cor.2005.03.002.

23. Ruiz-Femenia R., Guillén-Gosálbez G., Jiménez L., Caballero J. A. Multi-objective optimization of environmentally conscious chemical supply chains under demand uncertainty // Chemical Engineering Science. 2013. Vol. 96. Pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.ces.2013.02.054.

24. *Rodriguez M. A., Vecchiotti A. R., Harjunkski L., Grossmann L. E.* Optimal supply chain design and management over a multi-period horizon under demand uncertainty. Part I: MINLP and MILP models // *Computers & Chemical Engineering*. 2014. Vol. 62. Pp. 194–210. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2013.10.007.
25. *Shankar B. L., Basavarajappa S., Chen J. C.H., Kadavevaramath R. S.* Location and allocation decisions for multi-echelon supply chain network—A multi-objective evolutionary approach // *Expert Systems with Applications*. 2013. Vol. 40, Issue 2. Pp. 551–562. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.07.065.
26. *Sarrafha K., Rahmati S. H. A., Niaki S. T. A., Zaretalab A.* A bi-objective integrated procurement production and distribution problem of a multiechelon supply chain network design: A new tuned MOEA // *Computers & Operations Research*. 2014. Vol. 54. Pp. 35–51. DOI: 10.1016/j.cor.2014.08.010.
27. *Pasandideh S. H. R., Niaki S. T. A., Asadi K.* Optimizing a bi-objective multi-product multiperiod three echelon supply chain network with warehouse reliability // *Expert Systems with Applications*. 2015. Vol. 42, Issue 5. Pp. 2615–2623. DOI: 10.1016/j.eswa.2014.11.018.
28. *Ерёмкина Н. В., Сюбаева Н. И., Тысечникова Я. Г.* Актуальные проблемы экономической безопасности // *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe*. 2016. Т. 10, № 1. С. 39–42.
29. *Shah N. H., Chaudhari U., Cárdenas-Barrón L. E.* Integrating credit and replenishment policies for deteriorating items under quadratic demand in a three-echelon supply chain // *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*. 2020. Vol. 7, Issue 1. Pp. 34–45. DOI: 10.1080/23302674.2018.1487606.
30. *Hajiaghaei-Keshteli M., Fathollahi-Fard A. M.* Sustainable closed-loop supply chain network design with discount supposition // *Neural Computing and Applications*. 2019. Vol. 31, Issue 5. Pp. 10–29. DOI: 10.1007/s00521-018-3369-5.
31. *Nobil A. H., Nobil E., Sarker B. R.* Optimal decision-making for a single-stage manufacturing system with rework options // *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*. 2020. Vol. 7, Issue 1. Pp. 90–104. DOI: 10.1080/23302674.2018.1514087.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Рогулин Родион Сергеевич

Ассистент кафедры математики и моделирования Владивостокского государственного университета экономики и сервиса, г. Владивосток, Россия (690014, Приморский край, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41); ORCID: 0000-0002-3235-6429; e-mail: rafassiaofusa@mail.ru.

## ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

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. DOI: 10.15826/vestnik.2020.19.4.023.

## ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Дата поступления 27 мая 2020 г.; дата поступления после рецензирования 6 июля 2020 г.; дата принятия к печати 20 сентября 2020 г.

# Modeling of Promising Interaction Between a Timber Industry Enterprise and a Commodity Exchange in Russia

R. S. Rogulin  

Vladivostok State University Economy and Service,

Vladivostok, Russia

 rafassiaofusa@mail.ru

**Abstract.** The relevance of the study lies in the absence of works in the literature devoted to the formation of supply chains of materials in volumes sufficient for production using the apparatus of commodity exchanges. The aim of the work is to conduct an empirical study to assess the prospects for the interaction of a timber industry enterprise with a commodity exchange. For the study, a mathematical model was chosen to assess the effectiveness of the purchase of raw materials from the forestry department of the commodity exchange by an enterprise in the timber industry. The hypothesis is that the interaction of the timber industry complex can be beneficial for the enterprise. To ensure the feasibility of purchasing raw materials from the exchange, simulation modeling was chosen. For each individual simulation iteration, a linear integer programming mathematical model was used. To generate some input data, like price, demand, etc., the Monte Carlo method was used. The complexity of the problem lies in the following aspects: polynomial growth of the number of numbers; a large number of restrictions on the increase in the degree of complexity of finding the first feasible solution to the model; search for a solution within the framework of integer optimization; a fairly large number of independent simulation iterations. The practical significance of the study is to prove the expediency of purchasing raw materials by the enterprise from the commodity and raw materials exchange of Russia. The theoretical significance of the study lies in the development of a model for assessing the feasibility of purchasing materials using the exchange apparatus. The scientific novelty is based on the constructed mathematical model of the formation of supply chains and the volume of production, taking into account the demand in the market and the volume of materials. The model was tested on data from one forestry enterprise in the Primorsky Territory. Optimization is carried out in terms of the volume of products produced, the volume of purchased materials from each region and the stock of raw materials in the production warehouse. Based on the testing of data models of the exchange and the forestry enterprise, an analysis was performed of the possibilities for cooperation between the company and the commodity exchange. The work reflects the behavior in the long term of accumulated profit, the nature of changes in stock in the warehouse and the volume of products produced.

**Key words:** supply chains; enterprise economics; forest exchange; data analysis; resource consumption rate; warehouse capacity.

JEL M24, C51.

## References

1. Amiri, A. (2006). Designing a distribution network in a supply chain system: formulation and efficient solution procedure. *European Journal of Operational Research*, Vol. 171, Issue 2, 567–576. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.09.018.
2. Gebennini, E., Gamberini, R., Manzini, R. (2009). An integrated production–distribution model for the dynamic location and allocation problem with safety stock optimization. *International Journal of Production Economics*, Vol. 122, Issue 1, 286–304. DOI: 10.1016/j.ijpe.2009.06.027.

3. Konak, A., Coit, D.W., Smith, A.E. (2006). Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 91, Issue 9, 992-1007. DOI: 10.1016/j.res.2005.11.018.
4. Rahimikelarjani, B., Saidi-Mehrabad, M., Barzinpour, F. (2020). A Mathematical Model for Multiple-Load AGVs in Tandem Layout. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, Vol. 13, 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*, Vol. 13, 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*, Vol. 13, 167–176. DOI: 10.22094/joie.2019.363.0.
7. Ackermann, F., Eden, C. (2020). Strategic Options Development and Analysis. *Systems Approaches to Making Change: A Practical Guide*. Edited by M. Reynolds, S. Holwell. Springer, 139–199. DOI: 10.1007/978-1-84882-809-4\_4.
8. Scavarda, L.F., Reichhart, A., Hamacher, S., Holweg, M. (2010). Managing product variety in emerging markets. *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 30, Issue 2, 205–224. DOI: 10.1108/01443571011018716.
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*, Vol. 13, 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 emery sustainability index for bio diesel supply network design. *Energy Conversion and Management*, Vol. 92, 312–321. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.12.066.
11. Cardona-Valdés, Y., Alvarez, A., Ozdemir, D. (2011). A bi-objective supply Alvarez chain design problem with uncertainty. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 19, Issue 5, 821–832. DOI: 10.1016/j.trc.2010.04.003.
12. El-Sayed, M., Afia, N., El-Kharbotly, A. (2010). A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk. *Computer & Industrial Engineering*, Vol. 58, Issue 3, 423–431. DOI: 10.1016/j.cie.2008.09.040.
13. Schut, P.Z., Tomasgard, A., Ahmed, S. (2009). Supply chain design under uncertainty using sample average approximation and dual decomposition. *European Journal of Operational Research*, Vol. 199, Issue 2, 409–419. DOI: 10.1016/j.ejor.2008.11.040.
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*, Vol. 28, Issue 6–7, 1131–1144. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2003.09.014.
15. Georgiadis, M.C., Tsiakis, P., Longinidis, P., Sofioglou, M.K. (2011). Optimal design of supply chain networks under uncertain transient demand variations. *Omega*, Vol. 39, Issue 3, 254–272. DOI: 10.1016/j.omega.2010.07.002.
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 Systems with Applications*, Vol. 38, Issue 5, 6125–6131. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.11.008.
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*, Vol. 20, 729–753. DOI: 10.1007/s11750-010-0162-8.
18. Guoquan Zhang, G., Shang, J., Li, L. (2011). Collaborative production planning of supply chain under price and demand uncertainty. *European Journal of Operational Research*, Vol. 215, Issue 3, 590–603. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.07.007.
19. Pishvae, M.S., Farahani, R.Z., Dullaert, W. (2010). A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design. *Computers & Operations Research*, Vol. 37, Issue 6, 1100–1112. DOI: 10.1016/j.cor.2009.09.018.

20. Easwaran, G., Üster, H. (2010). A closed-loop supply chain network design problem with integrated forward and reverse channel decisions. *IEEE Transactions*, Vol. 42, Issue 11, 779–792. DOI: 10.1080/0740817X.2010.504689.
21. Mehrbod, M., Tu, N., Miao, L., Dai, W. (2012). Interactive fuzzy goal programming for a multiobjective closed-loop logistics network. *Annals of Operations Research*, Vol. 201, Issue 1, 367–381. DOI: 10.1007/s10479-012-1192-4.
22. Lu, Z., Bostel, N. (2007). A facility location model for logistics systems including reverse flows: the case of remanufacturing activities. *Computers & Operations Research*, Vol. 34, Issue 2, 299–323. DOI: 10.1016/j.cor.2005.03.002.
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. *Chemical Engineering Science*, Vol. 96, 1–11. DOI: 10.1016/j.ces.2013.02.054.
24. Rodriguez, M. A., Vecchietti, A. R., Harjunkoski, 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. *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 62, 194–210. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2013.10.007.
25. Shankar, B. L., Basavarajappa, S., Chen, J. C. H., Kadavevaramath, R. S. (2013). Location and allocation decisions for multi-echelon supply chain network—A multi-objective evolutionary approach. *Expert Systems with Applications*, Vol. 40, Issue 2, 551–562. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.07.065.
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. *Computers & Operations Research*, Vol. 54, 35–51. DOI: 10.1016/j.cor.2014.08.010.
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*, Vol. 42, Issue 5, 2615–2623. DOI: 10.1016/j.eswa.2014.11.018.
28. Eremina, N. V., Siubaeva, N. I., Tysiachnikova, I. G. (2016). Aktualnye problemy ekonomicheskoi bezopasnosti (Summary Shadow Economy And Its Manifestations On The Example Of «Black» Accounting). *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe*, Vol. 10, No. 1, 39–42.
29. Shah, N. H., Chaudhari, U., Cárdenas-Barrón, L. E. (2020). Integrating credit and replenishment policies for deteriorating items under quadratic demand in a three-echelon supply chain. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, Vol. 7, Issue 1, 34–45. DOI: 10.1080/23302674.2018.1487606.
30. Hajiaghaei-Keshteli M., Fathollahi-Fard A.M. (2019). Sustainable closed-loop supply chain network design with discount supposition. *Neural Computing and Applications*, Vol. 31, Issue 5, 10–29. DOI: 10.1007/s00521-018-3369-5.
31. Nobil, A. H., Nobil, E., Sarker, B. R. (2020). Optimal decision-making for a single-stage manufacturing system with rework options. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, Vol. 7, Issue 1, 90–104. DOI: 10.1080/23302674.2018.1514087.

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

### Rogulin Rodion Sergeevich

Assistant, Department of Mathematics and Modeling, Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, Russia (690014, Primorsky Territory, Vladivostok, Gogol street, 41); ORCID: 0000-0002-3235-6429; e-mail: rafassiaofusa@mail.ru.

## FOR CITATION

Rogulin R. S. Modeling of Promising Interaction Between a Timber Industry Enterprise and a Commodity Exchange in Russia. *Journal of Applied Economic Research*, 2020, Vol. 19, No. 4, 489–511. DOI: 10.15826/vestnik.2020.19.4.023.

## ARTICLE INFO

Received May 27, 2020; Revised July 6, 2020; Accepted September 20, 2020.

