

DOI: [10.17323/2587-814X.2020.4.19.35](https://doi.org/10.17323/2587-814X.2020.4.19.35)

Модель оптимизации плана закупок сырья из регионов России лесоперерабатывающим комплексом

Р.С. Рогулин 

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
Адрес: 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, д. 41

Дальневосточный федеральный университет
Адрес: 690922, Приморский край, остров Русский, п. Аякс, д. 10

Аннотация

В статье предложена модель формирования устойчивых цепочек поставок сырья для лесоперерабатывающего комплекса, позволяющая в совокупности оптимизировать план закупок на российской сырьевой бирже и план выпуска готовой продукции. Модель представляет собой задачу математического программирования, в качестве целевой функции которой используется прибыль предприятия, а входными данными являются прогнозные значения структуры и объемов предложений на российской товарной бирже и спроса на готовую продукцию. Рекуррентные зависимости модели описывают потоки сырья на складе предприятия с учетом поступлений по закупаемым лотам, времени нахождения в пути и расходом ресурсов на производство моделируемых объемов выпускаемой продукции. Ограничения в модели представляют собой формализацию ограниченности потока финансовых ресурсов с учетом продаж и характеристики склада. Переменными оптимизации являются объемы посуточного выпуска готовой продукции по заданной номенклатуре и переменные, задающие включение лота в портфель приобретаемых на бирже заявок. Решение модели находится методом ветвей и границ с предварительным отсечением модифицированным методом Гомори. Рассмотрен пример формирования оптимальных планов закупки и выпуска лесоперерабатывающего комплекса из Приморского края, не имеющего собственных лесных участков, обеспечивающих производство сырьем. Дана оценка целесообразности взаимодействия предприятия с лесным отделом товарно-сырьевой биржи.

Ключевые слова: цепочка поставок; экономика предприятия; лесная биржа; анализ данных; норма затрат ресурсов; вместимость склада.

Цитирование: Рогулин Р.С. Модель оптимизации плана закупок сырья из регионов России лесоперерабатывающим комплексом // Бизнес-информатика. 2020. Т. 14. № 4. С. 19–35. DOI: 10.17323/2587-814X.2020.4.19.35

Введение

В любой отрасли экономики производство является достаточно сложным и трудоемким процессом, при управлении которым возникают разные по уровню и степени сложности задачи, требующие соответствующего инструментария для нахождения оптимальных решений. В своей стратегии развития предприятие может ориентироваться на разные с финансовой точки зрения цели. В большинстве случаев такой целью является максимизация получаемой прибыли, величина которой зависит от многих факторов внешней и внутренней среды предприятия.

Как правило, весь процесс производства можно разделить на три стадии. Первая – обеспечение материальными ресурсами (сырье, материалы). Вторая – производство. Третья – реализация готовой продукции, в том числе логистика.

Каждый из этих процессов сложен по-своему. Серьезную проблему любому производству в лесной отрасли доставляет обеспечение ресурсами [1]. Если необходимое сырье приобретается за пределами предприятия, то перед предприятием стоит задача выбора лучшего варианта по покупке и доставке сырья из районов добычи до места производства. Для лесопромышленного предприятия, покупающего сырье на товарной бирже, количество возможных вариантов на горизонте планирования в несколько месяцев достаточно велико, что требует анализа значительного объема данных и использования специальных инструментов [2, 3].

Другим важным вопросом является задача выбора оптимального объема производимой продукции по каждому виду, с учетом сложившегося на рынке спроса [3, 4]. Однако формировать план производства на среднем или дальнем горизонтах планирования без понимания сложившейся конъюнктуры рынка сырья сложно и даже опасно для дальнейшего существования предприятия. Может оказаться, что цены на сырье слишком высоки для его покупки в достаточном количестве, в то время как план производства сверстан из расчета на получение этого вида сырья. В связи с этим для качественного планирования объемов производства важен учет тенденций на рынке сырья.

Для решения вопроса об оптимальном плане выпуска необходимо строить его на основе имеющегося прогноза или известного распределения

заявок, продаваемых на рынке. Таким образом, возникает вопрос, известный в литературе как проблема управления цепями поставок (supply chain management, SCM).

1. Обзор литературы и постановка задачи

Задачи класса SCM всегда сложны с нескольких точек зрения. Во-первых, нет точного универсального метода поиска оптимальных или более-менее эффективных решений задач класса SCM [4]. Во-вторых, существует огромное число факторов, которые необходимо учесть при поиске решений [1, 3, 5].

В лесной отрасли имеется своя специфика процесса доставки сырья. Сырье, добываемое в лесной отрасли, очень похоже на продукцию пищевой промышленности, поскольку у обоих присутствует временной фактор – фактор годности запасов. Если сырье лежит слишком долго, то высока вероятность того, что оно испортится и потеряет ликвидность. Поэтому скорость доставки сырья до пункта производства должна быть максимальной [2, 3].

Для достижения максимальной скорости доставки сырья, чтобы сырье оставалось ликвидным для производителя, необходимо, во-первых, знать распределение рыночных заявок [1], во-вторых, учитывать время доставки сырья [4, 6], в-третьих, учитывать не менее важный фактор количества потребляемых типов сырья на единицу производимого товара, а также учитывать запасы каждого сырья и максимальную вместимость склада.

Авторы работы [7] разработали для системы доставки сырья одну из редких чисто линейных моделей. В результате преобразования задачи линейного программирования в двухэтапную задачу, основанную на сценариях, появилась возможность устранить неопределенность уровней производства и погодных условий. Модель с применением сценариев свела к минимуму общие затраты, включая на транспортировку, расширение склада и штрафы за нарушение пропускной способности.

Авторы работы [4] решили задачу о формировании цепочки поставок, принимая во внимание нормы трудозатрат на производство каждой единицы продукции. Коллектив авторов моделирует ситуацию по доставке до потребителей конечного товара путем формирования матрицы входных и выходных потоков. В качестве целевой функции использовался показатель разности дохода от продаж и затрат на транспортировку товаров. Следует

отметить, что решение такой задачи носит одно-разовый характер для сложившейся текущей ситуации, а для решения последующих задач по поставке товаров потребуются снова решать эту задачу. Это крайне сложно с точки зрения объема вычислений.

В статье [8] рассмотрен новый многопериодный проект цепочки поставок из нескольких продуктов, который учитывает экономические, экологические и социальные аспекты. Модель нацелена на минимизацию общей стоимости системы, включая постоянные затраты на установку, транспортировку, производство, закупку, распределение и охрану окружающей среды. В модели рассматриваются несколько аспектов проектирования сети цепочек поставок, таких как пропускная способность объектов, максимальный радиус охвата, ограниченный бюджет, а также минимально приемлемый уровень для социальной оценки предприятий и распределительных центров. Модель фиксирует различные категории неопределенности, включая как сторону поставщика, так и сторону получателя. Чтобы иметь дело с неопределенными параметрами, применяется подход нечеткого программирования с ограниченными возможностями. Несколько тестовых задач используются для анализа характеристик предлагаемой задачи. Результаты расчетов показывают, что учет различных категорий неопределенности имеет решающее значение для проектирования эффективной и действенной сети цепочек поставок. К недостаткам данной модели следует отнести отсутствие учета доставки сырья до пункта производства, а также максимального объема сырья и товаров, которые могут одновременно находиться на складах.

Авторы работы [9] утверждают, что снижение рыночных цен приводит к необходимости снижения затрат на поставку древесной щепы для обеспечения прибыльности в цепочке поставок и продолжения поставок лесной щепы. Измельчение и транспортировка являются двумя основными факторами, влияющими на общие расходы в системе снабжения биотопливом. Для того, чтобы полностью использовать полезную нагрузку грузового транспорта и снизить транспортные расходы, остатки лесозаготовок обычно скалывают при посадке так, чтобы минимизировать пустое пространство. Для подрядчика важно максимально увеличить долю эффективного рабочего времени по отношению к запланированному рабочему времени. В настоящее время весьма распространено мнение, что эффективное рабочее время составляет менее 50

процентов от запланированного рабочего времени из-за транспортировки стружки с использованием дробилки, ожидания грузовиков для стружки и других задержек. Повышенная загрузка измельчителя требует большей координации между ним и погрузчиками стружки, доставляющими произведенную стружку заказчику. С помощью дискретно-событийного моделирования были построены модели систем снабжения, с целью изучения того, как расстояние транспортировки, количество грузовых автомобилей, планирование смены и буферы стружки влияют на системные затраты для высокопроизводительной системы дробилки. Стоимость системы и загрузка машины сильно различаются в зависимости от конфигурации системы.

В работе [10] авторами предложен новый подход для повторной оптимизации планов транспортировки бревенчатых грузовиков в режиме реального времени при обнаружении непредвиденного события. Этот подход использует пространственно-временную сеть для представления эволюции транспортной сети с течением времени и изменений, которые она претерпевает после сбоя. Разрешенные поездки и операции загрузки / выгрузки используются в качестве входных данных для математической модели. Последнее решение представляет собой конечный транспортный план. Процедура моделирования была разработана для генерации непредвиденных событий для реальных приложений. По сравнению с полным информационным сценарием, где предполагается, что сбой известен заранее, предлагаемый подход дает очень хорошие результаты. Кроме того, как утверждают авторы, математическая модель была решена за несколько секунд и, таким образом, хорошо подходит для использования в реальном времени. Однако следует отметить, что авторы не учитывают разные дополнительные факторы, такие как производство и вместимость склада.

Авторы статьи [11] предложили воспользоваться генетическим алгоритмом (genetic algorithm, GA), чтобы найти набор Парето-оптимальных решений многоцелевой цепочки поставок с четырьмя эшелонами, используя два различных подхода к взвешиванию. Авторы работы [12] разработали модель для поставок сырья с применением 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 мета-

эвристики, основанные на GA, чтобы решить эти проблемы. В работе [13] предоставлены сети поставок, основанные на генетических алгоритмах, в частности, основанных на знаниях (knowledge-based genetic algorithm, KBGA) для оптимизации. В работе [14] 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 для получения оптимальных по Парето решений

Кроме того, в работе [15] авторы рассмотрели двухступенчатую модель стохастического программирования, используемую для проектирования и управления цепочками поставок биодизеля на производствах разных типов. Модель отражает влияние неопределенности в поставках биомассы и технологий на решения, связанные с цепочкой поставок. Авторы решили эту проблему, используя алгоритмы, сочетающие релаксацию Лагранжа и методы L-образного решения.

На основании проведенного обзора литературы можно считать, что тематика формирования цепочек поставок сырья серьезно прорабатывалась в литературе и, ввиду отсутствия единых подходов к решению этой проблемы, имеет высокую степень актуальности. Кроме того, отсутствуют работы, которые рассматривали бы возможность поставок сырья с товарно-сырьевых бирж с учетом различных производственных ограничений.

Таким образом, целью исследования является разработка метода формирования оптимальных планов закупки сырья на товарной бирже и выпуска готовой продукции, обеспечивающих максимум прибыли предприятия до налога на заданном горизонте планирования, чтобы оценить возможности сотрудничества предприятия с биржей.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- ◆ разработать математическую модель, позволяющую максимизировать прибыль предприятия на основе оптимизации планирования закупок и объемов производства с использованием прогноза структуры и объемов предложений на российской товарной бирже и спроса на готовую продукцию;

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

- ◆ предложить подход к оценке возможностей сотрудничества предприятия с биржей.

2. Модель формирования оптимального плана закупок сырья и выпуска готовой продукции

Типовое предприятие лесопереработки может иметь возможность аренды участка (выиграть тендер), найти в ближайшем округе деляны (юридическая форма взятых в аренду лесных участков) и закупать сырье с этой деляны, а также рассмотреть альтернативные источники поставок сырья, включая внешние источники [16, 17]. Далее будем рассматривать предприятия, которые закупают сырье из внешних источников. Для тестирования модели возьмем одно из предприятий Приморского края России.

Таким образом, рассматривается задача формирования оптимальных планов закупки сырья и выпуска продукции производственной компанией лесоперерабатывающей отрасли на заданном горизонте планирования M с учетом предложений на рынке со стороны лесодобывающих предприятий и спроса на готовую продукцию.

В начальный момент времени $t = 0$ происходит планирование закупок сырья и производства продукции на весь заданный горизонт $t \in \{0, 1, \dots, M\}$. На этом горизонте для каждого m -го дня заданы набор предложений на рынке сырья (в виде заявок на товарно-сырьевой бирже) и спрос на производимую продукцию на рынке за рассматриваемый период. Биржевая заявка 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 модели будем рассматривать накопленную прибыль.

Введем следующие параметры и переменные:

l – вид сырья для производства готовой продукции, $l = 1, \dots, L$;

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

c_{ilm} – цена покупки i -й заявки сырья l -го типа в r -м регионе в m -й день (руб.), включая стоимость доставки;

v_{ilm} – объем сырья типа l в заявке i из региона r в день m (m^3);

u_{lm} – запас на складе сырья типа l в день m (m^3);

u^{max} – максимальная вместимость склада (m^3);

\dot{y}_{ilm} – объемы сырья типа l , купленные в предыдущем периоде, в отношении которых известно, что они поступят на склад в день m (M^3);

A_{lk} – объем затраченного ресурса l на производство единицы товара k (M^3);

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

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

FC – постоянные затраты в расчете на один день (руб.);

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

l – количество заявок, которые были выкуплены предприятием в предыдущий период (до момента $m = 0$) и для которых даты прихода на склад известны;

R – количество регионов, из которых выставляются заявки (добывается и выставляется на торги сырье) на бирже;

T_r – норма временных затрат (в днях) на доставку любого объема сырья из региона r по железной дороге;

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

M – рассматриваемый горизонт планирования (дни), называемый текущим периодом;

\dot{M} – количество дней из текущего периода, для которых закупленные заявки поступят на склад в течение следующего периода;

$Budget_0$ – бюджет предприятия, отведенный для введения торгов, по состоянию на момент начала работы модели;

\dot{x}_{km} – гипотетический объем производства продукции типа k в день $m = 1 : \dot{M}$, 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) и (4) соответственно (математическая запись ограничений приведена ниже).

Значения параметров u_{l0} и $Budget_0$ задаются и соответствуют последнему дню предыдущего периода.

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

В результате математическая формулировка задачи выглядит следующим образом:

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

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

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

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

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

$$y_{ilm} = \begin{cases} 1, & \text{если куплена заявка } i \text{ с сырьем} \\ & \text{типа } l \text{ в регионе } r \text{ в день } m \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (6)$$

$$Budget_0 + \sum_{m=1}^{m^*} \left(\sum_k (p_{km} - z_k) x_{km} - \sum_{i,l,r} c_{ilm} y_{ilm} - FC \right) \geq 0, m^* = 1 : M \quad (7)$$

$$x_{km} \leq \sum_n Q_{nkm}, \quad k = 1 : K, m = 1 : M \quad (8)$$

$$Budget_0 = const \quad (9)$$

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

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

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

Выражение (1) представляет собой целевую функцию, отражающую суммарную прибыль производства. Выражение (2) отражает рекуррентное соотношение запаса каждого вида сырья по состоянию на каждый день, в зависимости от периода планирования. Выражения (3) и (4) гарантируют наличие сырья на складе в пределах между минимальным запасом и максимальной вместимостью склада. Выражение (5) означает, что суммарное количество затраченного ресурса каждого вида не превысит запаса соответствующего типа сырья на складе в день m . Выражение (6) отражает принятое решение. Выражение (7) отражает минимальный объем бюджета в день m^* . Выражение (8) ограничивает объем про-

изводства спросом на рынке. Выражения (9) и (10) представляют собой входные данные. Выражение (11) гарантирует целочисленность полученного решения. Отметим, что выражение (12) при поиске оптимального решения не участвует, поэтому формула (12) используется после найденного оптимального решения модели (1–11).

Отдельного внимания заслуживает вычитаемая часть в целевой функции (1). Предприятие не имеет возможности покупки части лота ввиду специфики работы товарно-сырьевой биржи, поэтому в модели (1–12) в вычитаемой части целевой функции имеет место бинарная переменная y_{irm} . Иначе говоря, компания либо берет лот полностью¹ (и тогда платит фиксированную стоимость за полный объем сырья в заявке, включающую стоимость доставки), либо отказывается от покупки целиком.

Модель (1–11) представляет собой задачу линейного целочисленного программирования. Отметим некоторые особенности данной задачи. Первое – то, что количество переменных растет с полиномиальной скоростью ($O(\alpha^4)$). Второе – то, что количество ограничений с высокой вероятностью накладывает серьезную сложность на поиск первого допустимого решения, т.к. может резко уменьшаться полиэдральное допустимое множество решений [15, 18, 19].

Для ее решения будем использовать метод ветвей и границ с предварительным отсечением модифицированным методом Гомори, включенным в систему MathWorks².

3. Тестирование модели и калибровка

Для апробации модели было выбрано предприятие ООО «ДНС-Лес». Компания осуществляет непрерывное производство определенных видов товаров. По определенным не зависящим от компании причинам административного характера она не может получить в аренду участки для добычи сы-

рья. Поэтому предприятие рассматривает возможность закупки сырья из регионов РФ через Санкт-Петербургскую международную товарно-сырьевую биржу³ (далее – «биржа»). Предприятие использует два основных вида сырья: пиловочник ($l = 1$) и балансы ($l = 2$). Породы сырья не имеют значения ввиду технологических особенностей. Данные по результатам торгов на бирже размещаются на официальном сайте, где можно увидеть совершенные сделки за любой период.

Для тестирования модели используются данные предприятия «ДНС-Лес» и биржи за пять месяцев (с 01.02.2019 по 31.06.2019). За этот период по всем интересующим предприятие видам сырья было выставлено 752 заявки. Согласно данным биржи, за этот период в качестве продавцов сырья в торгах участвовали лесозаготовительные предприятия четырех регионов: Иркутская область ($r = 1$), Республика Удмуртия ($r = 2$), Московская область ($r = 3$) и Пермский край ($r = 4$). Поскольку биржа не раскрывает реальные названия и местоположения продавцов, более детальная информация о них отсутствует. За указанный период был собран массив следующих данных: цены предлагаемых заявок c_{irm} , объемы заявок v_{irm} , цены реализации конечных товаров p_{km} , количество заявок по каждому типу сырья. Кроме того, на основе анализа статистики продаж предприятия будем считать заданным на рассматриваемом горизонте планирования ежедневный спрос каждого вида товара $\sum_n Q_{nkm}$ ⁴.

Будем считать, что цены p_{km} , по которым реализуются товары на рынке, фиксированы и не изменяются в рамках горизонта планирования. Рассмотрим три случая ценовой политики предприятия. В первом случае цены расчетного периода совпадают с ценами, по которым предприятие реализовывало товары в период с января по июль 2019 г. Во втором случае цены предыдущего периода увеличиваются на 5%, что примерно соответствует уровню инфляции. В третьем варианте предприятие повышает ка-

¹ В этот лот уже включена стоимость доставки, т.к. у рассматриваемого предприятия отсутствует возможность самостоятельной доставки купленного сырья до своего склада. Здесь стоит уточнить, что если покупатель в состоянии самостоятельно заниматься доставкой сырья, то значение параметра c_{irm} может иметь два значения: включающее и не включающее стоимость доставки. Если предприятие выбирает между оформлением доставки и отказом от нее, то такое решение можно рассматривать, как модификацию данной модели

² MathWorks. Documentation. Mixed-Integer Linear Programming Algorithms: <https://it.mathworks.com/help/optim/ug/mixed-integer-linear-programming-algorithms.html>

³ Официальный сайт Санкт-Петербургской международной товарно-сырьевой биржи (АО «СПбМТСБ»): <https://spimex.com/markets/wood/trades/results/>

⁴ Для дальнейших исследований в области моделирования процессов в области SCM планируется делать прогноз спроса на продукцию производителя на основе данных, имеющихся у предприятия. Однако в данной работе был использован уже зафиксированный объем спроса за 2019 год, и оценка возможности взаимодействия предприятия с биржей проводится на основе именно этих данных

чество выпускаемой продукции и считает, что может увеличить цены на величину, превосходящую инфляцию в два раза. Ежедневный объем спроса каждого типа будем задавать как равномерно распределенную случайную величину на интервале от 0 до 15. При увеличении цены на процент инфляции предполагаем, что такая динамика характерна для рынка в целом, поэтому спрос не меняется. При динамике цен выше изменений в целом по рынку будем считать, что эластичность спроса по цене примерно равна единице. Для рассмотрения изменения прибыли для каждой ценовой политики проведем по 50 реализаций определения оптимальных решений задачи и усредним показатели прибыли.

Таблица 1.

Основные входные параметры предприятия «ДНС-Лес»

Параметр, ед. измерения	Значение параметра
$u^{max}, \text{м}^3$	7500
$u^{min}, \text{м}^3$	100
$u_{j0}^5, \text{м}^3$	(1550; 1550)
$p_{km}, \forall m \geq 0, k=1:9, \text{тыс. руб.}$	(22,1; 32,8; 40,8; 43,7; 45,5; 48,5; 57,5; 60,5; 66,9) ⁶
$T_r, \text{дни}$	(3; 5; 6; 5)
$Budget_0, \text{руб.}$	10 000 000
$FC, \text{руб.}$	1 000 000

Источник: ООО «ДНС-Лес»⁷

Основные входные данные, характеризующие предприятие, представлены в *таблицах 1 и 2*.

Рассмотрим инструментальную сторону задачи. Расчеты выполнялись на компьютере с оперативной памятью в 16 Гб и с 12-поточным процессором Ryzon 2600x. В качестве встроенной функции воспользуемся intlinprog, которая является составной частью языка программирования Matlab. В качестве входных массивов для встроенной функции используем:

- ◆ целевую функцию, умноженную на -1^8 ;
- ◆ ограничения целочисленности всех переменных модели;
- ◆ матрицы ограничений;
- ◆ векторы правых сторон для ограничений типа равенств и неравенств;
- ◆ нижние и верхние границы значений переменных;
- ◆ начальную точку для поиска решения (пустой вектор);
- ◆ максимальное количество вершин полиэдрального множества допустимых решений, которое может пройти алгоритм (ед).

Поскольку задача имеет большую размерность, мы не можем гарантировать, что оптимальное решение будет найдено за адекватное время, поэтому было решено ограничить количество проходимых вершин множества допустимых решений в 10^7 ед. Если решение было найдено, но алгоритм вышел из цикла в связи с указанным выше ограничением, то будем считать, что решение является не оптимальным, а «условно-эффективным».

Таблица 2.

Затраты сырья на производство единицы товара

Тип сырья / номер товара (l) / (k)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\sum_k A_{lk}$
1	2	5	6	6	6	5	8	8	12	58
2	3	4	5	6	8	10	9	10	7	62

Источник: ООО «ДНС-Лес»

⁵ На начальный момент ($m = 0$) работы алгоритма (входные данные)

⁶ Вектор цен на конечные товары с номерами. По этим ценам предприятие отпускало товары на рынке пять месяцев подряд

⁷ Официальный сайт ООО «ДНС-Лес». Россия, Приморский край, г. Спасск-Дальний: <http://dns-les.ru/>

⁸ Умножение на (-1) обусловлено спецификой встроенной функции intlinprog. По умолчанию она направлена на поиск минимального значения целевой функции. Более детально с этой функцией можно ознакомиться по ссылке: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html>

4. Обсуждение

В процессе тестирования было получено оптимальное решение. Время работы алгоритма составило 124,32 секунды, пройдено 87 562 вершины. Рассмотрим более подробно результаты решения задачи о поставках сырья на склад компании.

На рисунках 1 и 2⁹ представлена визуализация объемов запасов u_{lm} сырья l для каждого дня t . Более темным цветом отражается запас сырья на складе, более светлым – его поступление v_{lm} . Видно, что запас не опускался ниже значения $u^{min} = 100 \text{ м}^3$ и не превышал $u^{max} = 7500 \text{ м}^3$. Кроме того, следует отметить, что объем ресурса $l = 2$ в среднем хранился на

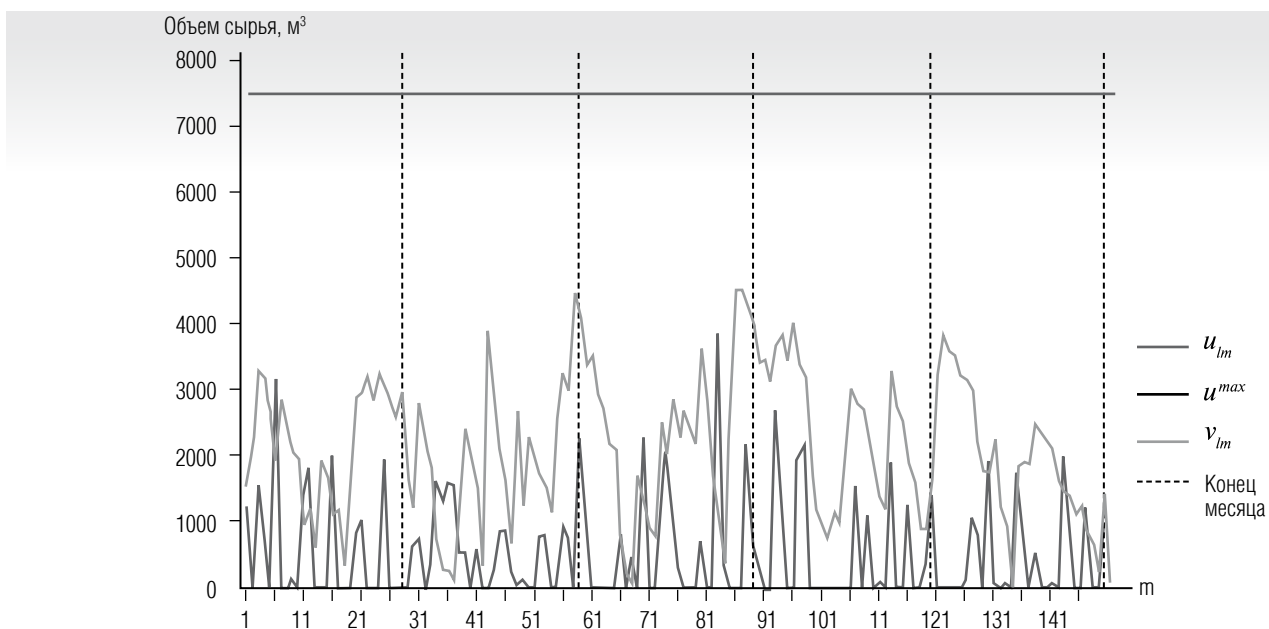


Рис. 1. Визуализация поступления и текущего состояния запасов сырья на складе на временном интервале $m = 1, \dots, M$ тип сырья $l = 1$

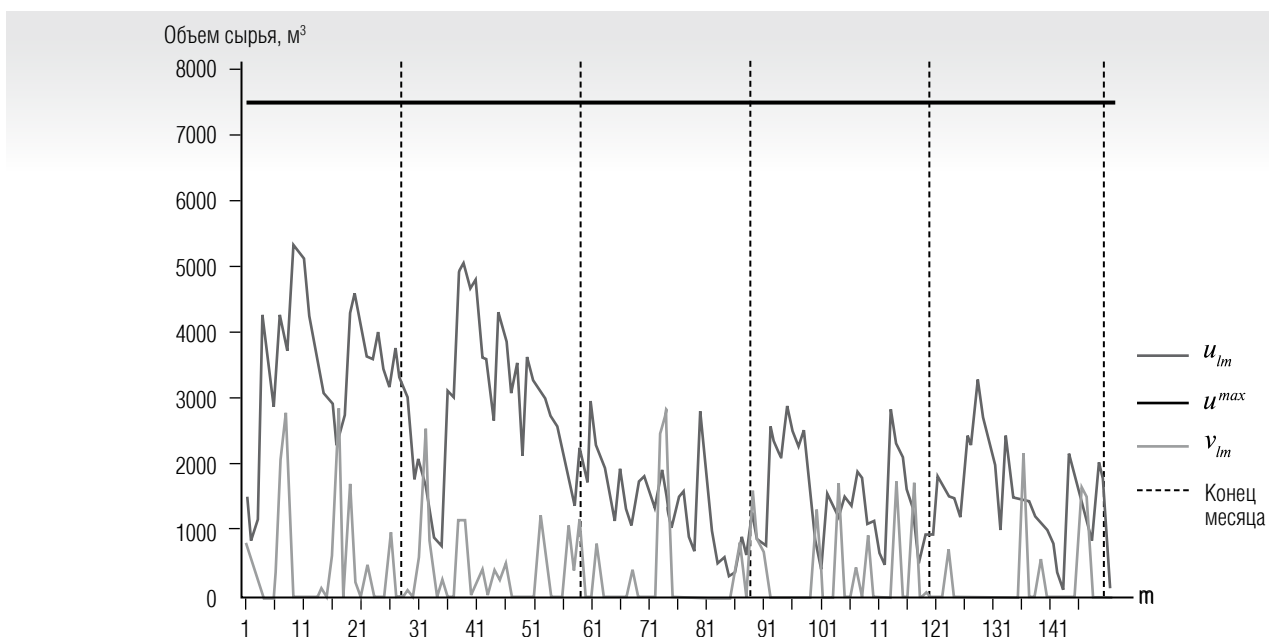


Рис. 2. Визуализация поступления и текущего состояния запасов сырья на складе на временном интервале $m = 1, \dots, M$ тип сырья $l = 2$

⁹ Все рисунки, кроме 4а и 4б, относятся к случаю, когда цены заданы без поправок на инфляцию

складе больше, чем $l = 1$. Это связано с нормой расходов сырья A_{jk} на каждую единицу товара. Основной приход сырья $l = 1$ приходится на март, апрель и май. Основной приход сырья $l = 2$ приходится на февраль и март. Интенсивность поставок сырья $l = 1$ выше, чем у $l = 2$, что связано с нормами затрат на производство A_{jk} . Отдельно отметим, что запас сырья на складе существенно меняется, что говорит о сложности планирования закупок сырья.

На *рисунке 3* показан суммарный запас сырья на складе. Видно, что все пять случаев, когда запас сырья на складе был максимальным, приходятся на февраль и март. Это связано с тем, что запасы сырья второго типа в эти месяцы являлись максимальными. Из *рисунка 3* следует, что пороговое значение минимального объема сырья на складе было достигнуто лишь однажды – в конце периода планирования. За исключением этого момента минимальный зафиксированный объем сырья на складе не опускался (вторая половина апреля, 84 день планирования) ниже отметки 990 м^3 . Из *рисунка 3* также видно, что планирование цепочек поставок сырья представляет собой крайне сложную задачу, поскольку перепады объемов сырья на складе очень большие. Поэтому предприятию имеет смысл рассмотреть возможность расширения вместимости склада.

На *рисунках 4а* и *4б* приведена визуализация средних значений накопленной и ежедневной прибыли предприятия соответственно. На *рисунках* обозначены динамика прибыли без учета роста цен в течение горизонта планирования, с учетом пятипроцентного роста цен ($p_{km} = 1,05 p_{km}$)¹⁰, а также в случае десятипроцентного роста цен ($p_{km} = 1,01 p_{km}$). Видно, что суммарное значение прибыли после апреля стабилизируется. Это связано со спросом, который к лету ослабевает¹¹, то есть присутствует фактор сезонности.

Рассмотрим *рисунки 5* и *6*. На них показаны объемы купленного сырья $l = 1$ и $l = 2$ из каждого региона по месяцам. Нижний столбик означает объем сырья, купленного в регионе. Сумма верхнего (надстройка) и нижнего столбиков означает объем сырья, выставленного на торги регионом в соответствующий месяц. Из этих рисунков следует, что больше всего сырья поступило из Иркутской области. Этот феномен объясняется тем, что максимальный объем сырья (относительно всех участников биржи) выставляется на торги именно в этом регионе. Также следует принять во внимание, что время доставки из Иркутской области является минимальным. Однако в апреле зафиксировано (*рисунк 5*), что объем сырья, полученный из Пермского

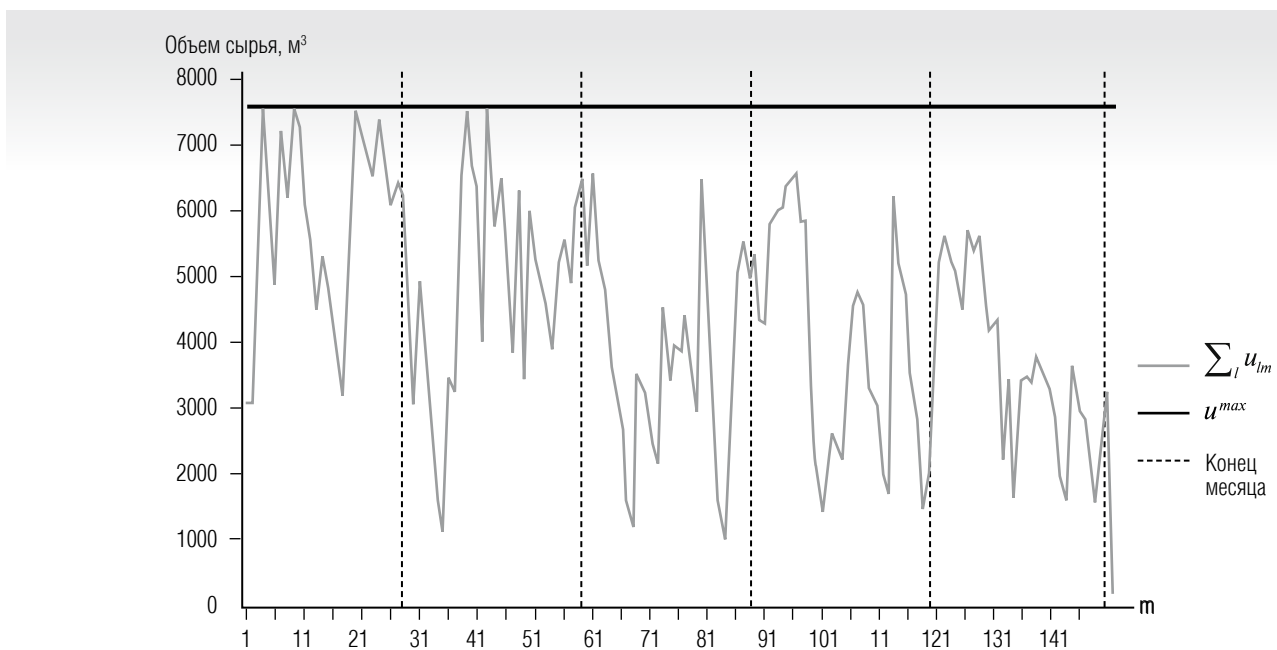


Рис. 3. Визуализация текущего состояния суммарного запаса всех видов сырья на складе $\sum_i u_m$ по состоянию на каждый день

¹⁰ В данном абзаце знак « \Rightarrow » выступает в качестве оператора переписывания.

¹¹ По данным ООО «ДНС-Лес»

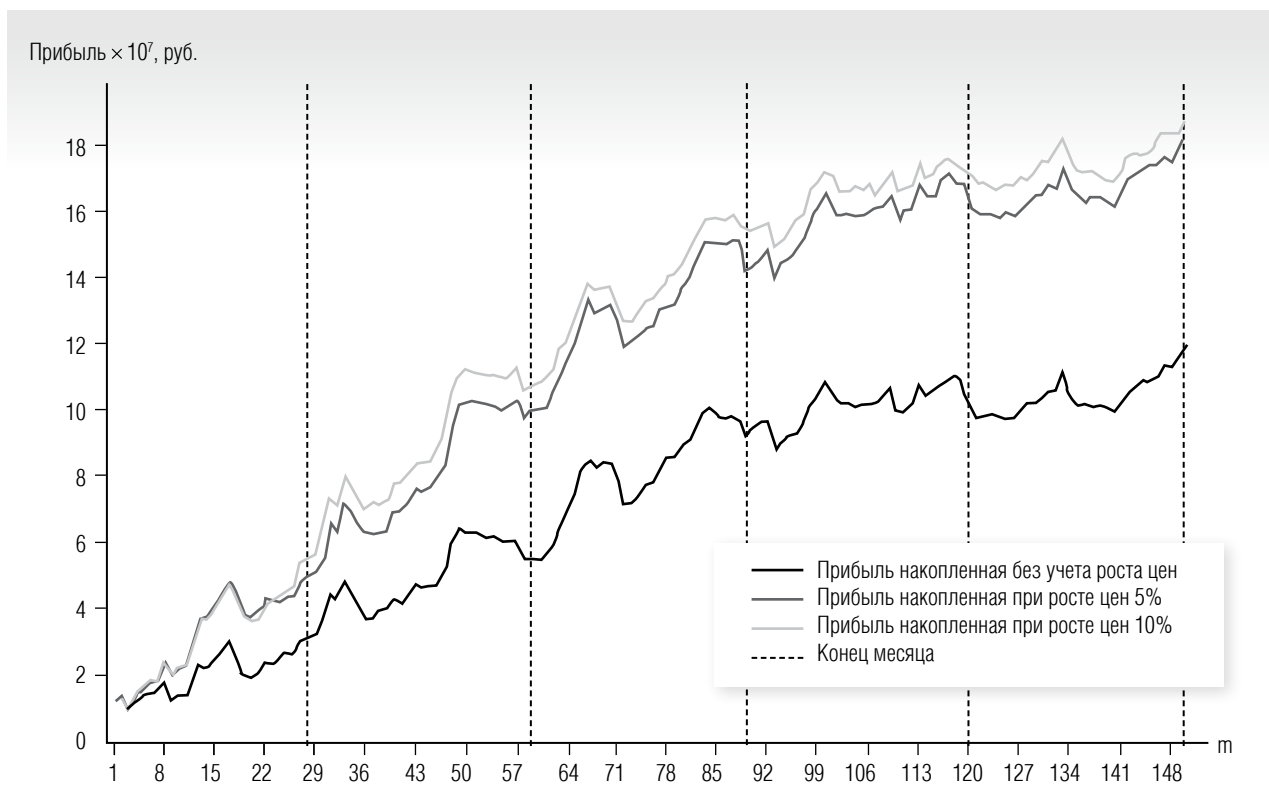


Рис. 4а. Визуализация средней накопленной прибыли предприятия

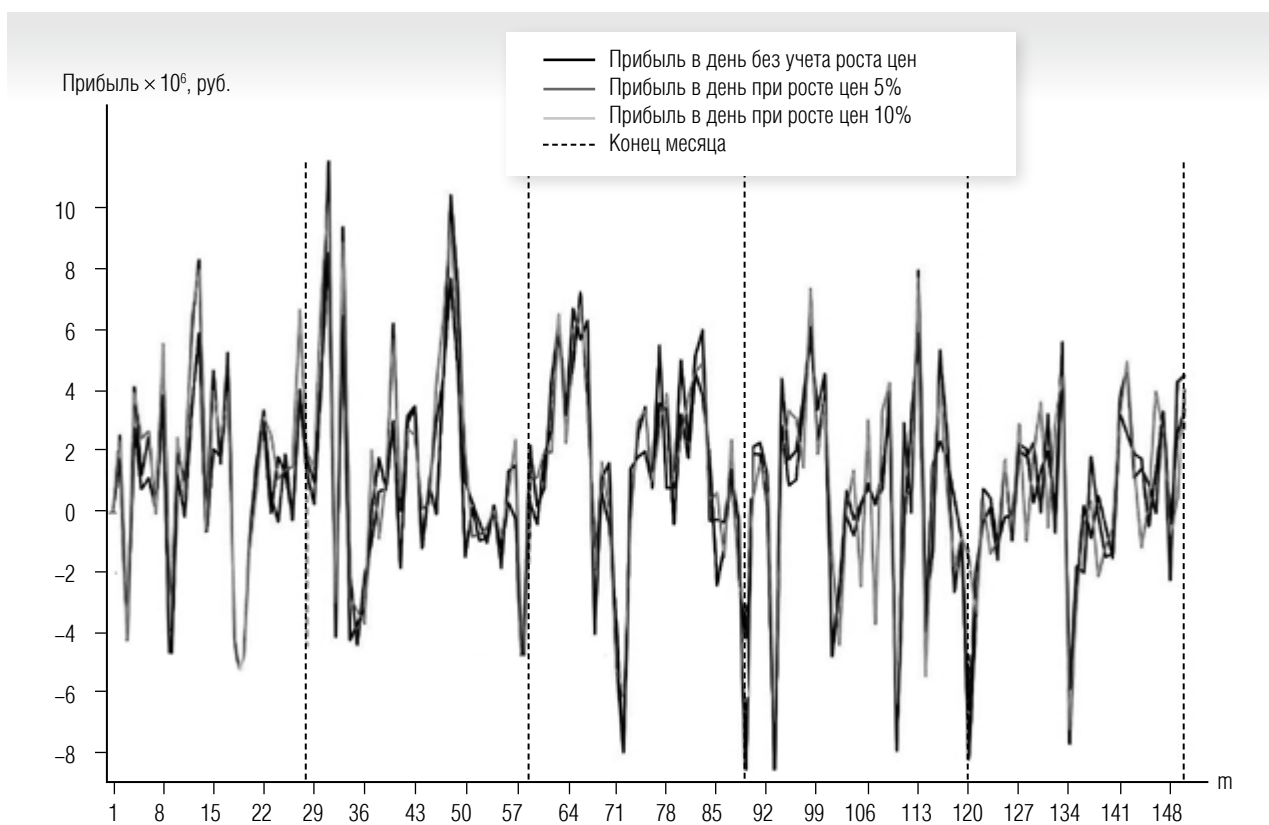


Рис. 4б. Визуализация средней ежедневной прибыли предприятия

края примерно такой же, как и объем, полученный из Иркутской области. Кроме того, в феврале (рис. 5) зафиксировано, что объемы поступившего сырья из Пермского края не ниже, чем объемы сырья, закупленные в Иркутской области, несмотря на то, что каждый месяц объем сырья в Иркутской области торгуется в больших объемах. Это объясняется ценами на сырье. Цены на сырье в Иркутской области выше, чем в любом другом регионе, что объясняется близостью этого региона к Китаю. В частности, имеется прямая железнодорожная ветка до КНР, где предприниматели покупают сырье по высоким ценам. В Пермском крае цены намного ниже, и он территориально более удален от Китая. Отсюда можно сделать вывод, что на практике предприятию следует осуществлять мониторинг рынка сырья в Пермском крае. Если в этом регионе сырье выставлено на торги, то его следует пристально рассматривать как потенциальное для покупки.

Кроме того, отметим, что по добываемому объему сырья Пермский край занимает второе место из четырех рассматриваемых регионов. Объем вывоза сырья из оставшихся регионов не вызывает инте-

реса, т.к. он в совокупности не превышает 30% от суммарного объема, полученного из Иркутской области и Пермского края.

Также из рисунков 5 и 6 следует, что объем добываемого сырья любого типа убывает по мере приближения к весне и лету. Это связано с транспортными проблемами при добыче сырья. Как правило, производство идет на ухищрение, которое в случае вскрытия надзирающими органами влечет за собой административную и уголовную ответственность, а также отзыв аренды участка для добычи сырья. Дело в том, что в Министерстве природных ресурсов и экологии Российской Федерации утверждаются нормы вырубki лесов каждый год по кварталам. Однако, поскольку в период межсезонной распутицы и летних высоких температур добывать сырье сложнее, предприниматели вырубают зимой больше, чем положено в квартал, а в годовой отчетности распределяют добытый объем согласно указаниям Министерства (что, несомненно, ведет к неправильной эксплуатации лесных ресурсов). Эту тенденцию можно заметить на рисунках 5 и 6¹².

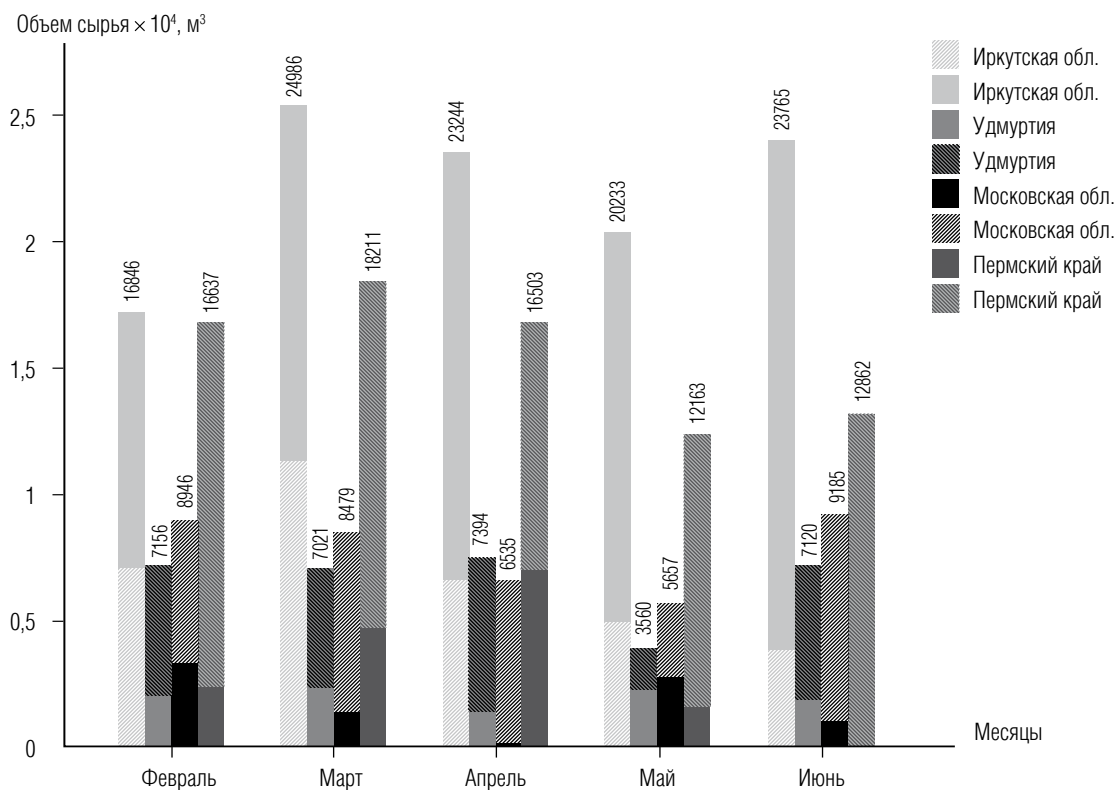


Рис. 5. Визуализация добываемых объемов сырья в каждом из регионов по месяцам

¹² Заметим, что данные биржи лишь показывают объем совершенных сделок, но и из них можно сделать те же выводы

Отдельно следует рассмотреть пары рисунков (1, 5) и (2, 6). Из них можно увидеть, что объем покупаемой продукции также снижается, что сказывается на стабилизации значения накопленной прибыли (рисунок 4).

Рассмотрим рисунок 7, на котором приведена визуализация объемов производства каждого продукта предприятия по месяцам. Данный рисунок отражает последствия снижения рыночного спроса на рынке к лету и, соответственно, стабилизацию роста накопленной прибыли (рисунок 4а).

Можно заметить, что объемы производства товаров первого и восьмого видов к лету возрастают по сравнению с маем, несмотря, на то, что статистика покупок этих видов товаров показывает падение производства.

Также можно утверждать, что объем производства товаров второго типа следует уменьшать по мере приближения к лету.

Рассмотрим поведение объемов производства товаров 3, 4, 5 и 9. Объем реализованной продукции к марту достигает своего пика (3, 4, 9) в то время, как после этого месяца объем проданной продукции этих типов неизменно падает. Исключение со-

ставляет 5-й тип товара: для него рост и падение производства монотонны (максимальный объем производства был достигнут в апреле, но после наметился спад).

Исключением из общего правила о снижении объемов реализации каждого типа продукции стал товар 6. Он показывает уверенный рост относительно зимнего и раннего весеннего периодов. Таким образом, производство должно обратить внимание на его дальнейший выпуск в летний период.

Отметим, что объем производства товара типа 7 ведет себя несколько более сложно, чем другие. Здесь отчетливо можно заметить «скачущую» тенденцию производства. Однако определенно можно сказать, что этот тип товара всегда в значительной мере входил в план производства и, соответственно, имеет смысл включать его в летний производственный план.

Следует отметить, что при доставке сырья до потребителя в лесной отрасли есть особенность, заключающаяся в том, то предприятие часто отказывается от сырья, если последнее находится в пути достаточно долго (больше, чем указано в договоре купли-продажи). Это связано с потерей сырьем ка-

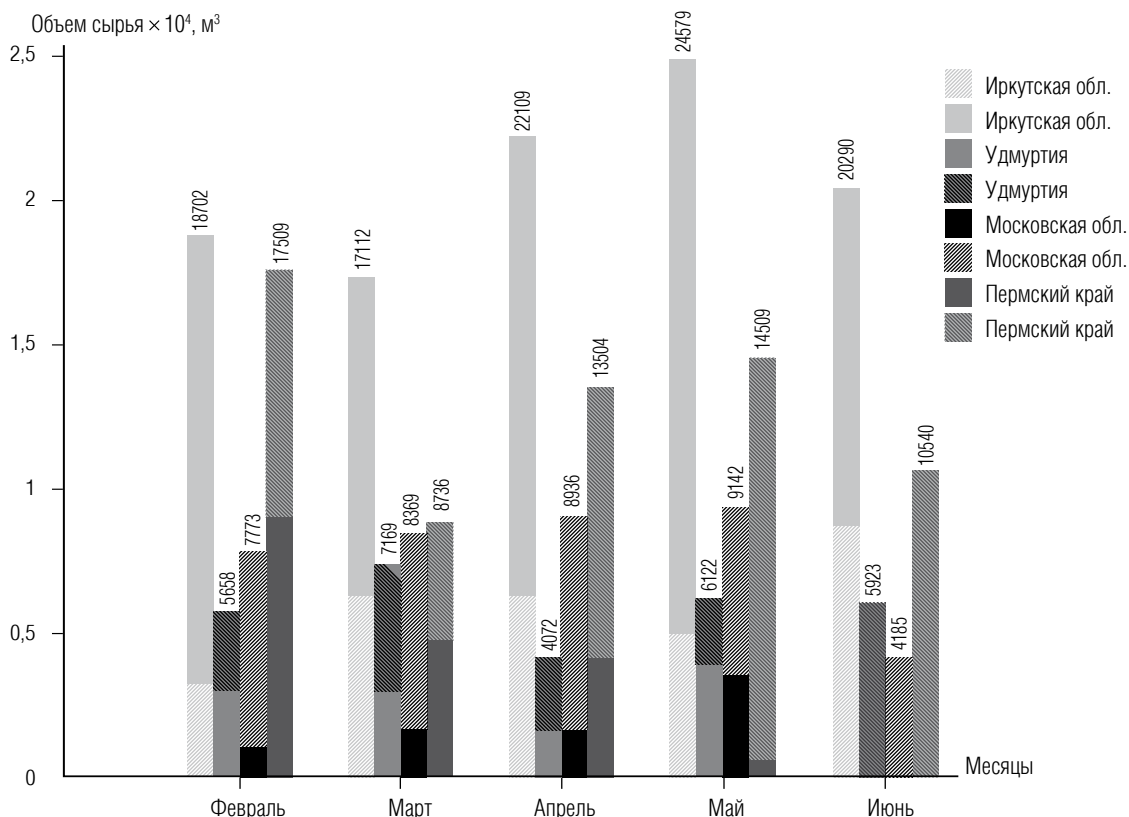


Рис. 6. Визуализация добываемых объемов сырья в каждом из регионов по месяцам

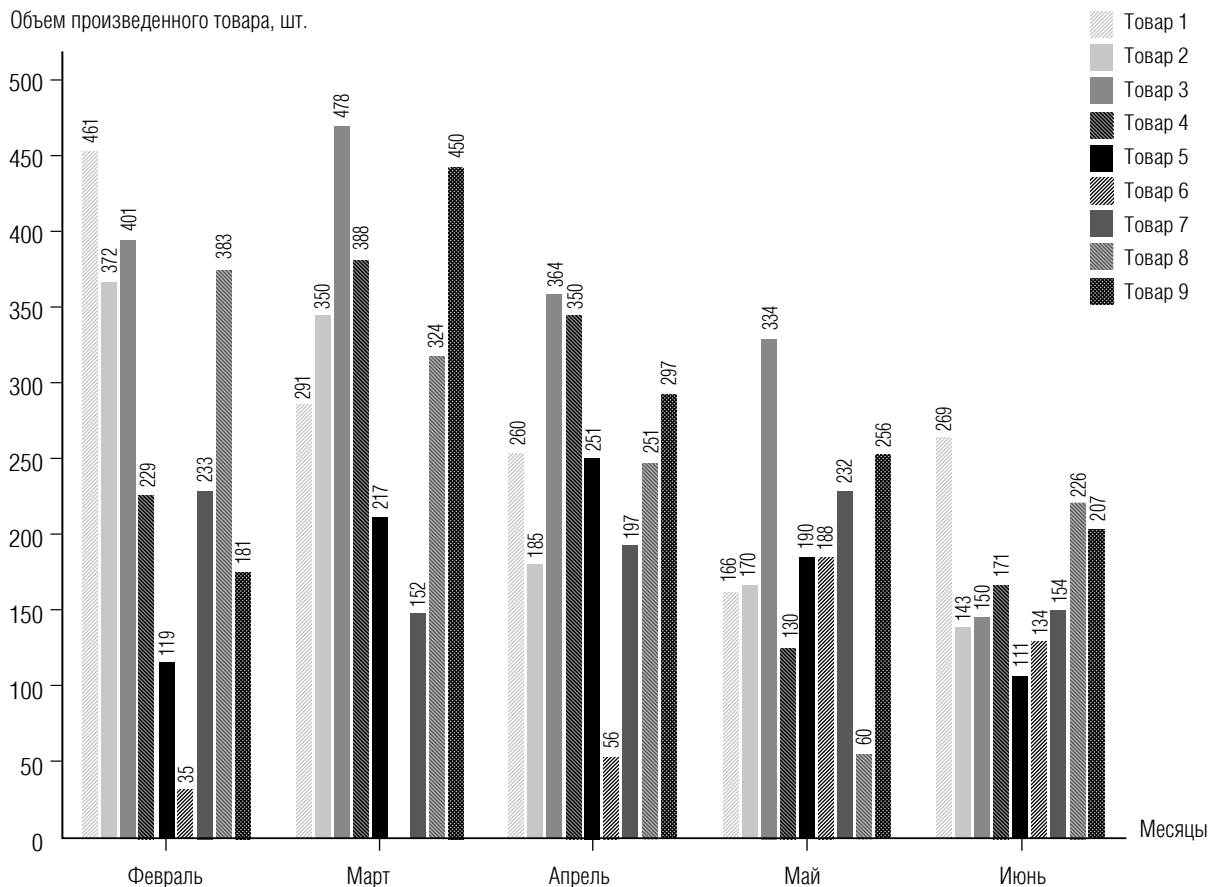


Рис. 7. Визуализация объемов производства каждого продукта предприятия по месяцам

чества, необходимого для производства в соответствии с технологией. Для моделирования данной особенности необходима модификация модели, которая может быть получена путем введения вероятностного распределения, характеризующего расстояние, пройденное каждый день по железной дороге, с учетом времени года. Как известно, чем ближе к зиме, тем ниже пропускная способность железных дорог.

Кроме того, следует упомянуть изменения в технологических процессах производства, в результате которых затраты на производство уменьшаются: $A_{lk}^{m+1} = \max(0, A_{lk}^m - \varepsilon_{lk})$, где A_{lk}^m – затраты сырья l на производство единицы товара k в день m , ε_{lk} – случайная неотрицательная величина. Учет вероятности изменения технологии производства представляет собой существенную модификацию модели. В конкурентной среде при моделировании процессов

производства и цепочек поставок сырья этот фактор становится одним из ключевых.

В данной статье рассмотрено предприятие, у которого нет своих делян. Однако следует учитывать, что в будущем предприятие может получить свои деляны, что также качественно скажется на его ценовой и ресурсной политиках.

Кроме того, необходимо провести тест решения, полученного на основе построенной модели. Такое решение может быть неустойчиво, если цены и объем спроса, будут меняться динамически. Для этого необходимо вводить стохастические величины (вычислять разные векторы цен по каждому типу товаров в каждый день) и многократно (скорее всего, параллельно¹³) возобновлять вычисления. Это, несомненно, существенно увеличит нагрузку на процессор и оперативную память. Также остается открытым вопрос о методе решения таких задач, по-

¹³ Параллельное программирование: <http://www.ccas.ru/mmes/distcompbook.pdf>

сколькo нелинейные и/или стохастические задачи не имеют единого подхода к их решению [1, 4, 16].

Заключение

В работе предложена модель формирования устойчивых цепочек поставок сырья для предприятия лесоперерабатывающей отрасли. Модель позволяет максимизировать значение доналоговой прибыли и представляет собой задачу математического программирования, отличающуюся возможностью одновременного учета, с одной стороны, производственных норм потребления сырья для выпуска конечной продукции, а другой – формирования вектора закупок сырья на товарно-сырьевой бирже. Решением модели являются структура производства, последовательность закупки производством сырья на товарно-сырьевой бирже и значение прибыли в каждый отдельно взятый день работы предприятия. Процесс поиска оптимального решения задачи усложняется ее большой размерностью, целочисленными ограничениями и быстро растущей нагрузкой на оперативную память. Для решения таких задач стоит пользоваться комбинированными алгоритмами. В работе реализован двухступенчатый метод Гомори. С практической точки зрения, модель представляет собой инструмент, позволяющий сформировать оптимальный план производства на основе производственных факторов и объемов предложений сырья на товарно-сырьевой бирже в рамках всего горизонта планирования. В условиях отсутствия возможности привлечения капитала извне модель позволяет находить оптимальное решение, позволяющее предприятию избегать кассового разрыва.

Апробация модели выполнена на примере лесоперерабатывающего комплекса из Приморского края. На основе проведенных расчетов и полученного решения сформулированы рекомендации для управляющего звена компании по сотрудничеству с товарно-сырьевой биржей. Анализ решения показал, что, несмотря на территориальную близость Иркутской области к Приморскому краю, имеет смысл обратить внимание на покупку сырья из Пермского края, где имеется достаточный сырьевой потенциал и наблюдается более приемлемая ценовая политика. Как показал анализ, производство большинства типов товаров следует сокращать по мере приближения к лету, ввиду сезонности спроса и добычи сырья. В целом приведенные расчеты позволяют сделать выводы о возможности рациональных закупок сырья на товарно-сырьевой бирже.

Для анализа качественно более сложных бизнес-процессов предприятия имеет смысл выполнить модификацию модели путем введения вероятностных экономико-производственных факторов. Однако в этом случае остается открытым вопрос о методе решения усложненной задачи. ■

Благодарности

Автор выражает благодарность предприятию ООО «ДНС-Лес» за предоставленную информацию, а также ее генеральному директору Н. Тимоходцеву и начальнику лесного и производственного отдела А. Сычикову. Автор также выражает признательность своему научному руководителю – заведующему кафедрой математики и моделирования Владивостокского государственного университета экономики и сервиса, доктору экономических наук Л.С. Мазелису.

Литература

1. Kogler C., Rauch P. Discrete event simulation of multimodal and unimodal transportation in the wood supply chain: A literature review // *Silva Fennica*. 2018. Vol. 52. No 4. Article ID 9984. DOI: 10.14214/sf.9984.
2. Haddouch H., Beidouri Z., El Oumami M. Supply chain management: A review of approaches, practices and impact on performance // *International Journal of Supply Chain Management*. 2019. Vol. 8. No 6. P. 1–13.
3. Escorcía-Caballero J.P., Moreno-Luzon M.D., Chams-Anturi O. Supply chain integration capability: An organizational routine perspective // *International Journal of Supply Chain Management*. 2019. Vol. 8. No 5. P. 39–47.
4. Обобщенная оптимизационная задача производственно-транспортных процессов на предприятии / П.С. Рогулин и [др.] // *Прикладная информатика*. 2018. Т. 13. № 6 (78). С. 133–141.
5. Mishra D., Gunasekaran A., Papadopoulos T., Childe S.J. Big Data and supply chain management: A review and bibliometric analysis // *Annals of Operations Research*. 2018. Vol. 270. No 1. P. 313–336. DOI: 10.1007/s10479-016-2236-y.
6. Tuljak-Suban D. Food supply chain: A review of approaches which enhance sustainability with a focus on social responsibility / 2016. [Электронный ресурс]: <https://www.intechopen.com/books/sustainable-supply-chain-management/food-supply-chain-a-review-of-approaches-which-enhance-sustainability-with-a-focus-on-social-respons> (дата обращения 01.07.2020). DOI: 10.5772/62536.
7. Cundiff J.S., Dias N., Sherali H.D. A linear programming approach for designing a herbaceous biomass delivery system // *Bioresource Technology*. 1997. Vol. 59. No 1. P. 47–55. DOI: S0960-8524(96)00129-0.

8. Zarrinpoor N. A chance-constrained fuzzy programming approach for a sustainable supply chain network design under multiple sources of uncertainty // *International Journal of Supply and Operations Management*. 2019. Vol. 6. No 4. P. 349–359. DOI: 10.22034/2019.4.5.
9. Eliasson L., Eriksson A., Mohtashami S. Analysis of factors affecting productivity and costs for a high-performance chip supply system // *Applied Energy*. 2017. Vol. 185. Part 1. P. 497–505. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.10.136.
10. Amrouss A., El Hachemi N., Gendreau M., Gendron B. Real-time management of transportation disruptions in forestry // *Computers & Operations Research*. 2017. Vol. 83. P. 95–105. DOI: 10.1016/j.cor.2017.02.008.
11. Altiparmak F., Gen M., Lin L., Paksoy T. A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks // *Computers & Industrial Engineering*. 2006. Vol. 51. No 1. P. 196–215. DOI: 10.1016/j.cie.2006.07.011.
12. Hnaïen F., Delorme X., Dolgui A. Multiobjective optimization for inventory control in two-level assembly systems under uncertainty of lead times // *Computers & Operations Research*. 2010. Vol. 37. No 11. P. 1835–1843. DOI: 10.1016/j.cor.2009.06.002.
13. Prakash A., Chan F.T.S., Liao H., Deshmukh S.G. Network optimization in supply chain: a KBGA approach // *Decision Support Systems*. 2012. Vol. 52. No 2. P. 528–538. DOI: 10.1016/j.dss.2011.10.024.
14. Shi S., Liu Z., Tang L., Xiong J. Multi-objective optimization for a closed-loop network design problem using an improved genetic algorithm // *Applied Mathematical Modelling*. 2017. Vol. 45. P. 14–30. DOI: j.apm.2016.11.004. DOI: j.apm.2016.11.004.
15. Marufuzzaman M., Eksioğlu S.D., Huang Y. Two-stage stochastic programming supply chain model for biodiesel production via wastewater treatment // *Computers & Operations Research*. 2014. Vol. 49. P. 1–17. DOI: j.cor.2014.03.010.
16. Задача комбинаторной оптимизации: поиск оптимального производственного и транспортного плана при организации производства на новых территориях / Р.С. Рогулин и [др.] // *Вестник УрФУ. Серия экономика и управление*. 2019. Т. 18. № 3. С. 364–377. DOI: 10.15826/vestnik.2018.17.3.018.
17. Rabiee M., Zandieh M., Ramezani P. Bi-objective partial flexible job shop scheduling problem: NSGA-II, NPGA, MOGA and PAES approaches // *International Journal of Production Research*. 2012. Vol. 50. No 24. P. 7327–7342. DOI: 10.1080/00207543.2011.648280.
18. Srinivas N., Deb K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms // *Journal of Evolutionary Computation*. 1994. Vol. 2. No 3. P. 221–248.
19. Bandyopadhyay S., Bhattacharya R. Solving a tri-objective supply chain problem with modified NSGA-II algorithm // *Journal of Manufacturing Systems*. 2014. Vol. 33. No 1. P. 41–50. DOI: j.jmsy.2013.12.001.

Об авторе

Рогулин Родион Сергеевич

аспирант департамента математики и моделирования, Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, д. 41;

ассистент кафедры прикладной математики, механики, управления и программного обеспечения, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, остров Русский, п. Аякс, д. 10;

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3235-6429

A model for optimizing plans for procurement of raw materials from regions of Russia in a timber-processing enterprise

Rodion S. Rogulin

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

Vladivostok State University of Economics and Service
Address: 41, Gogolya Street, Vladivostok 690014, Russia

Far Eastern Federal University
Address: 10, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok 690922, Russia

Abstract

In this paper a model for the formation of sustainable supply chains of raw materials for a timber processing complex is proposed. The model allows one to optimize the plan of purchases from the Russian Commodity Exchange, as well as the plan of manufacturing finished products. The model presents the task of mathematical programming, whereby the company's profit is used as the objective function, and the input data include the forecasted values of structure and volumes of offers available on the Russian Commodity Exchange, as well as demand for finished products. The recurrence dependencies of the model describe the flow of raw materials at the enterprise's warehouse, taking into account revenues from purchased lots, transportation time and consumption of resources that are required for production of simulated volumes of products. Constraints of the model represent formalization of the limited flow of financial resources, taking into account sales and warehouse characteristics. The optimization task deals with variables including volumes of daily output of finished products according to a given nomenclature, as well as variables that specify the inclusion of lots into the portfolio of applications purchased on the exchange. The model solution is found using the branch and bound method with preliminary clipping based on the modified Chvatal–Gomory method. One example considers formation of optimal plans for the purchase and sales in a timber processing complex located in the Primorsky Territory (Russia), which does not have its own forest plots providing production with raw materials. The usefulness of the interaction of the enterprise with the timber department of the commodity and raw materials exchange is assessed.

Key words: supply chain; enterprise economics; timber exchange; data analysis; resource consumption rate; warehouse capacity.

Citation: Rogulin R.S. (2020) A model for optimizing plans for procurement of raw materials from regions of Russia in a timber-processing enterprise. *Business Informatics*, vol. 14, no 4, pp. 19–35. DOI: 10.17323/2587-814X.2020.4.19.35

References

- Kogler C., Rauch P. (2018) Discrete event simulation of multimodal and unimodal transportation in the wood supply chain: A literature review. *Silva Fennica*, vol. 52, no 4, article ID 9984. DOI: 10.14214/sf.9984.
- Haddouch H., Beidouri Z., El Oumami M. (2019) Supply chain management: A review of approaches, practices and impact on performance. *International Journal of Supply Chain Management*, vol. 8, no 6, pp. 1–13.
- Escorcía-Caballero J.P., Moreno-Luzon M.D., Chams-Anturi O. (2019) Supply chain integration capability: An organizational routine perspective. *International Journal of Supply Chain Management*, vol. 8, no 5, pp. 39–47.
- Rogulin R.S., Nechayev P.V., Pleshanov D.Ye., Yevdakimova N.S., Goncharov Ye.D., Maksimenko V.I. (2018) Complex optimization problem of production-transport processes. *Prikladnaya Informatika – Applied Informatics*, no 6, pp. 133–141 (in Russian).
- Mishra D., Gunasekaran A., Papadopoulos T., Childe S.J. (2018) Big Data and supply chain management: A review and bibliometric analysis. *Annals of Operations Research*, vol. 270, no 1, pp. 313–336. DOI: 10.1007/s10479-016-2236-y.
- Tuljak-Suban D. (2016) *Food supply chain: A review of approaches which enhance sustainability with a focus on social responsibility*. Available at: <https://www.intechopen.com/books/sustainable-supply-chain-management/food-supply-chain-a-review-of-approaches-which-enhance-sustainability-with-a-focus-on-social-respons> (accessed 01 July 2020). DOI: 10.5772/62536.
- Cundiff J.S., Dias N., Sherali H.D. (1997) A linear programming approach for designing a herbaceous biomass delivery system. *Bioresource Technology*, vol. 59, no 1, pp. 47–55. DOI: S0960-8524(96)00129-0.
- Zarrinpoor N. (2019) A chance-constrained fuzzy programming approach for a sustainable supply chain network design under multiple sources of uncertainty. *International Journal of Supply and Operations Management*, vol. 6, no 4, pp. 349–359. DOI: 10.22034/2019.4.5.
- Eliasson L., Eriksson A., Mohtashami S. (2017) Analysis of factors affecting productivity and costs for a high-performance chip supply system. *Applied Energy*, vol. 185, part 1, pp. 497–505. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.10.136.
- Amrouss A., El Hachemi N., Gendreau M., Gendron B. (2017) Real-time management of transportation disruptions in forestry. *Computers & Operations Research*, vol. 83, pp. 95–105. DOI: 10.1016/j.cor.2017.02.008.
- Altıparmak F., Gen M., Lin L., Paksoy T. (2006) A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 51, no 1, pp. 196–215. DOI: 10.1016/j.cie.2006.07.011.
- Hnaïen F., Delorme X., Dolgui A. (2010) Multiobjective optimization for inventory control in two-level assembly systems under uncertainty of lead times. *Computers & Operations Research*, vol. 37, no 11, pp. 1835–1843. DOI: 10.1016/j.cor.2009.06.002.
- Prakash A., Chan F.T.S., Liao H., Deshmukh S.G. (2012) Network optimization in supply chain: a KBGA approach. *Decision Support Systems*, vol. 52, no 2, pp. 528–538. DOI: 10.1016/j.dss.2011.10.024.
- Shi S., Liu Z., Tang L., Xiong J. (2017) Multi-objective optimization for a closed-loop network design problem using an improved genetic algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, vol. 45, pp. 14–30. DOI: j.apm.2016.11.004. DOI: j.apm.2016.11.004.
- Marufuzzaman M., Eksioğlu S.D., Huang Y. (2014) Two-stage stochastic programming supply chain model for biodiesel production via wastewater treatment. *Computers & Operations Research*, vol. 49, pp. 1–17. DOI: j.cor.2014.03.010.

16. Rogulin R.S., Maksimenko V.I., Zlobina D.V., Zhandarmov V.O., Pugacheva E.S., Matveev V.V. (2019) The task of combinatorial optimization: The search for an optimal production and transport plan when organizing production in new territories. *Bulletin of Ural Federal University. Series Economics and Management*, vol. 18, no 3, pp. 364–377 (in Russian). DOI: 10.15826/vestnik.2018.17.3.018.
17. Rabiee M., Zandieh M., Ramezani P. (2012) Bi-objective partial flexible job shop scheduling problem: NSGA-II, NPGA, MOGA and PAES approaches. *International Journal of Production Research*, vol. 50, no 24, pp. 7327–7342. DOI: 10.1080/00207543.2011.648280.
18. Srinivas N., Deb K. (1994) Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Journal of Evolutionary Computation*, vol. 2, no 3, pp. 221–248.
19. Bandyopadhyay S., Bhattacharya R. (2014) Solving a tri-objective supply chain problem with modified NSGA-II algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 33, no 1, pp. 41–50. DOI: j.jmsy.2013.12.001.

About the author

Rodion S. Rogulin

Doctoral Student, Department of Mathematics and Modeling, Vladivostok State University of Economics and Service, 41, Gogolya Street, Vladivostok 690014, Russia;

Assistant Professor, Department of Applied Mathematics, Mechanics, Control and Software, Far Eastern Federal University, 10, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok 690922, Russia;

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3235-6429