

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

Морковина С.С., Харченко Н.Н., Иванова А.В., Кузнецов Д.К., Шешнищан С.С. Эколого-экономические модели реализации лесоклиматических проектов в Центральной лесостепи	5
Демаков Ю.П., Шейкина О.В., Шарапов Е.С., Королев А.С. Алгоритм отбора плюсовых насаждений и деревьев сосны обыкновенной в больших лесных массивах	21
Панин И. А., Залесов С. В. Лесные ресурсы ягодных кустарничков рода <i>Vaccinium</i> (L.) в условиях среднегорного рельефа Свердловской области	40
Гниненко Ю.И., Шакирова А.Д. Поиск средств защиты дуба от мучнистой росы	54
Конюшенков М.Е., Мартынюк А.А., Коршунов Н.А. Исследование пирологической ситуации на особо охраняемых природных территориях федерального значения	67
Алтаев А.А. Состояние лесов Селенгинского среднегорья	80

ЛАНДШАФТНАЯ АРХИТЕКТУРА

Мамаева Н.А., Молканова О.И. Особенности регенерации <i>in vitro</i> у некоторых сортов флокса метельчатого (<i>Phlox paniculata</i> L.), перспективных для использования в ландшафтных композициях	91
---	----

ДЕРЕВООБРАБОТКА И ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

Кононов Г.Н., Иванкин А.Н., Никитин А.А. Древесина как химическое сырье. История и современность. IX. Научные школы в области химии и химической технологии древесины в МЛТИ — МГУЛ — МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1925–2025 годы	102
Лоскутов С.Р., Казарян Л.К., Анискина А.А., Шапченкова О.А., Пермязова Г.В., Ефремов С.П., Пименов А.В. Термогравиметрия в исследовании внутривидовой физико-химической дифференциации популяций ели сибирской (<i>Picea obovata</i> L.)	135
Вариводина И.Н., Машкина О.С. Анализ качества древесины триплоидных и диплоидных гибридов тополя белого в условиях Воронежской области	147
Сафин Р.Р., Саерова К.В. Физико-химическое моделирование высокочастотной плазменной модификации древесины	158

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Артемов О.Г., Прокопьев С.В., Аюкаева Д.М., Беляев М.Ю., Волков О.Н., Батырев И.Ю., Тертицкий Г.М. Особенности проведения исследований по наблюдению подвижных объектов в эксперименте «Ураган» на Международной космической станции	171
---	-----

ЛЕСОИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО

Роголин Р.С. Управление лесопромышленным производственным процессом с учетом внешних рисков и имеющимся опытом предыдущих периодов	187
---	-----

CONTENTS

BIOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF FORESTRY

Morkovina S.S., Kharchenko N.N., Ivanova A.V., Kuznetsov D.K., Sheshnitsan S.S. Ecological and economic implementation models for forest-climatic projects in Central forest-steppe	5
Demakov Yu.P., Sheykina O.V., Sharapov E.S., Korolev A.S. Selection pattern for plus stands and Scots pine trees in large wooded areas	21
Panin I.A., Zalesov S.V. Genus <i>Vaccinium</i> (L.) berry bushes in Sverdlovsk region mid-mountains	40
Gninenko Yu.I., Shakirova A.D. Means to protect oak from powdery mildew	54
Konyushenkov M.E., Martynyuk A.A., Korshunov N.A. Forest fire studies in federal specially protected natural sites	67
Altaev A.A. Selenga middle mountain forests condition	80

LANDSCAPE ARCHITECTURE

Mamaeva N.A., Molkanova O.I. <i>In vitro</i> regeneration features in some varieties of <i>Phlox paniculata</i> L., promising for use in landscape compositions	91
--	----

WOODWORKING AND CHEMICAL WOOD PROCESSING

Kononov G.N., Ivankin A.N., Nikitin A.A. Wood as a chemical raw material. History and modernity. IX. Scientific schools in the field of chemistry and chemical technology of wood in MFEI — MSFU — BMSTU MB in 1925–2025	102
Loskutov S.R., Kazaryan L.K., Aniskina A.A., Shapchenkova O.A., Permyakova G.V., Efremov S.P., Pimenov A.V. Thermogravimetry in intraspecific physico-chemical differentiation study of Siberian spruce (<i>Picea obovata</i> L.)	135
Varivodina I.N., Mashkina O.S. Wood quality analysis of triploid and diploid white poplar hybrids in Voronezh region	147
Safin R.R., Saerova K.V. Physico-chemical modeling of high-frequency plasma modification of wood: from atomic mechanisms to engineering process optimization	158

MATH MODELING

Artem'ev O.G., Prokop'ev S.V., Ayukaeva D.M., Belyaev M.Yu., Volkov O.N., Batyrev I.Yu., Tertitskiy G.M. Observing mobile objects under the Uragan experiment onboard the International Space Station	171
---	-----

FOREST ENGINEERING

Rogulin R.S. Management of the forestry production process taking into account external risks and existing experience from previous periods	187
--	-----

УПРАВЛЕНИЕ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ С УЧЕТОМ ВНЕШНИХ РИСКОВ И ИМЕЮЩИМСЯ ОПЫТОМ ПРЕДЫДУЩИХ ПЕРИОДОВ

Р.С. Рогулин

ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса», Россия, 690014,
г. Владивосток, ул. Гоголя, д. 41

rafassiaofusa@mail.ru

Представлена математическая модель для оперативного планирования деятельности лесоперерабатывающего предприятия. Рассмотрена задача формирования суточных цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи и оптимальной загрузки производственных цехов. Разработанная модель, в отличие от известных подходов, позволяет учитывать технологию раскроя сырья и время доставки лотов в условиях неопределенности. Определены ключевые выходные показатели: оптимальная траектория прибыли на горизонте планирования, суточные объемы производства и закупки сырья. Модель протестирована на данных российской товарно-сырьевой биржи и предприятия Приморского края. Показано, что даже в сложных сценариях модель демонстрирует качественно высокие результаты и обеспечивает стабильное планирование. Рекомендуется к использованию для повышения эффективности управления на лесоперерабатывающих предприятиях.

Ключевые слова: формирование цепочек поставок, лесоперерабатывающие предприятия, математическая модель, время лотов в пути

Ссылка для цитирования: Рогулин Р.С. Управление лесопромышленным производственным процессом с учетом внешних рисков и имеющимся опытом предыдущих периодов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 6. С. 187–200. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-6-187-200

В течение многих веков лесное сырье имело важное значение в развитии человеческой цивилизации. Издревле лес предоставлял людям не только древесину для строительства жилищ и судов, но и пищу, лекарства, материалы для создания орудий труда и огнестрельного оружия. С развитием промышленности лесное сырье стало ключевым компонентом в производстве бумаги, мебели, строительных материалов, упаковок и множества других товаров.

В условиях современной мировой экономики и увеличивающейся численности населения, спрос на лесные ресурсы продолжает расти. Это обуславливает повышенный интерес к эффективному управлению цепочками поставок лесного сырья. Однако рост объемов и сложности процессов лесозаготовки, переработки и торговли обуславливает новые вызовы.

Неопределенности, с которыми сталкиваются компании в лесопромышленном секторе, представляют собой сложную совокупность факторов, которые могут существенно повлиять на эффективность и устойчивость цепочек поставок. В комплекс факторов входит не только

изменчивость рыночных цен, но и колебания спроса на различные виды леса, в частности на древесину, целлюлозу, древесные плиты и биомассу, а также природные бедствия, такие как лесные пожары, бурные ветры, засухи и наводнения.

Кроме того, политические риски, связанные с законодательными изменениями, регулированием отрасли и торговыми конфликтами, могут создавать дополнительные вызовы для компаний лесопромышленного сектора. Это может привести к изменениям в тарифах на экспорт и импорт, ограничениям на вырубку леса, изменениям в правилах и лицензировании, что может существенно повлиять на производственный процесс и стратегию управления цепочками поставок.

В связи с этим разработка математических моделей управления цепочками поставок лесного сырья в условиях неопределенности будущего предложения становится критически важной. Такие модели позволят компаниям адаптироваться к переменам на рынке, предусматривать возможные риски и принимать обоснованные решения на основе анализа ситуации и оптимизации процессов. С помощью модулей можно снизить издержки, улучшить

операционную эффективность и повысить конкурентоспособность компаний в лесопромышленном секторе.

Таким образом, разработка математических моделей, способных адаптироваться к переменным условиям рынка и осуществлять помощь компаниям лесопромышленного сектора эффективно управлять своими цепочками поставок сырья или товаров, имеет критическое значение для обеспечения устойчивости и конкурентоспособности лесопромышленной отрасли в долгосрочной перспективе.

Обзор литературных источников. Рассматриваемой проблеме посвящено много работ [1–32]. В работе [2] представлена модель двухступенчатой системы обращения с отходами, созданная на основе двух подмоделей. Авторы разработали концепцию задачи выбора маршрута транспортного средства и на базе двух подмоделей определяли эффективный маршрут сбора, сортировки отходов, их передачу в центр переработки и предложили метаэвристический алгоритм оптимизации. Однако ими не был учтен такой важный фактор, как прибыльность от выбранного маршрута. В работе [3] приведена замкнутая цепочка поставок с учетом социальных факторов, разработанная на основе двухкритериальной модели, адаптированная к одной из промышленных отраслей. Эта модель учитывает издержки производства и социальный фактор. Целевая функция модели была направлена на минимизацию затрат и максимизацию занятости в отрасли.

Помимо социальных факторов важной является прибыльность предприятия, не затронутая в работе [1]. Коллектив ученых [4] использовал гибридные метаэвристические подходы, основанные на методе Tabu Search (табу-поиск), для оптимизации систем производства кабелей. Это исследование посвящено моделированию проблемы планирования в кабельной промышленности, где целевая функция направлена на минимизацию общей стоимости производства. Суть авторского метода сводится к объединению гибридного метаэвристического подхода с методом Tabu Search. В работе [5] в отличие от [2–4] затрагивается проблема прибыльности предприятия, но не учитывается аспект, затрагивающий нормы затрат на производство единицы товара, что, как утверждается в работах [21, 22], может сильно влиять на итоговые финансовые показатели.

Коллектив ученых [5] предложил модель, позволяющую принимать эффективные решения, которые учитывают экологические проблемы, существующие на заводах по производству сахарного тростника. Была разработана

задача линейного смешанно-целочисленного программирования. Для решения поставленной задачи использовались три модификации генетического алгоритма. Метаэвристические подходы были настроены с использованием подхода Тагучи. Эффективность предложенного ими алгоритма доказывается с помощью дисперсионного анализа (ANOVA). Помимо экологических факторов важным является вопрос прибыльности предприятия, который не затронут в работе [5].

Авторы работы [6] представили новую модель многокритериального математического программирования для подбора поставщиков с учетом избранных факторов устойчивого развития. Основной целью их исследования были оценка поставщиков и этапы распределения заказов. Сложно согласиться с выводами, которые изложены в разделе об апробации модели, поскольку они не характеризуют финансовые показатели предприятия, которые неизбежно окажутся под прямым влиянием после заключения договоров с выбранными поставщиками.

Коллектив ученых [7] представил многоцелевую нечеткую модель формирования цепочек поставок. С учетом экономических и социальных аспектов, а также удовлетворенности клиентов авторам удалось отыскать более сбалансированное решение проблемы. В исследованиях авторы использовали один из нечетких методов теории игр.

В работе [8] представлена многоцелевая модель формирования цепочек поставок товаров с учетом многих особенностей технического характера, связанных с видом перевозимого товара. Параметры этой проектируемой модели считаются нечеткими, поэтому решение было найдено с применением методов нечеткой оптимизации со штрафными функциями.

В работах [7, 8] тем не менее, имеются недостатки. Как известно [1, 2, 21, 23], формирование цепочек поставок с учетом экономических, социальных и других аспектов недостаточно эффективно в отрыве от производственных процессов, поэтому важно учитывать эти процессы совместно с аспектами.

Разработана модель [9] формирования двухканальной зеленой цепочки поставок, состоящей из одного розничного продавца и одного производителя с отдельным каналом продаж для производителя. С помощью методов теории игр можно сравнивать случаи, когда участники решают конкурировать или сотрудничать исходя из ценообразования и производства, не затрагивая проблем, прямо влияющих на логистику.

В исследовании [10] рассчитаны оптимальные значения цен для реализации произведенных предприятием товаров с предположением, что не все товары могут быть «зелеными», и разработана модель формирования цепочки их поставок с учетом проводимой государством политики. В этой работе утверждается, что «озеленение» товаров было бы очень желательным, но такая гарантия не была обеспечена. Авторы предложили два варианта модели — централизованную и децентрализованную для анализа двух случаев: с учетом вмешательства государства и без него. При этом основное внимание уделено изучению стратегии ценообразования для максимизации общей прибыльности, но без учета важных технических особенностей производства. Вследствие применения новой ценовой политики, согласно мнению авторов, можно утверждать, что товары производятся экологически чистыми вне зависимости от направления государства.

Авторы работы [11] предложили модель инвентаризации фермерского предприятия с учетом выделяемых в атмосферу объемов газа. Исследование было проведено в целях определения оптимального периода размножения и желательного значения поголовья скота, однако, не была затронута проблема изменения финансовых показателей.

Автор [12] предложил математические модели формирования цепочек поставок, рассмотрев две ситуации в двух моделях. В модели I участвуют два производителя и покупатель, где прибыль каждого агента максимизируется. Модель II отражает ту же ситуацию, однако у покупателя есть выбор между двумя товарами двух разных производителей, в модели II спрос конечного потребителя зависит от цены и степени экологичности продукта. В модели II функция прибыли компаний 1 и 2 была сформулирована отдельно с учетом доходов от продаж, затрат на сохранение экологии и поддержание социальной ответственности. Основная цель данного исследования — найти оптимальную цену и обеспечить такое качество товара, чтобы прибыль была максимальной даже с учетом ограничений. Показана разница в решениях с учетом ответственного подхода к экологическим и социальным проблемам (модель II) и без них (модель I), однако не отражены особенности производственного процесса, влияющие на экологию и социум.

Коллектив ученых [13] разработал новую сеть замкнутой цепочки поставок товаров, производимых из орехов. Для предлагаемой сети была создана модель смешано-целочисленного линейного программирования в целях миними-

зации общих затрат. В модели учтены, спрос на данные товары на различных рынках и доработка возвращаемой потребителями продукции. Для решения проблемы использовались гибридные метаэвристические подходы.

Авторы [14] спроектировали и рассмотрели замкнутую сеть цепочки поставок сахарного тростника с использованием метаэвристических подходов, в которых была оптимизирована общая стоимость цепочки поставок. Использовались метаэвристические методы по трем гибридным метаэвристическим алгоритмам: H-GASA, H-KASA, H-RDASA. Результаты показали, что алгоритм H-KASA эффективнее решает задачи небольшой размерности. При этом в обоих случаях [13, 14] не использовались главные показатели цепочки поставок — их прибыльность.

В работах [23, 25–28] рассматриваются ключевые проблемы, с которыми сталкивается компания, в частности, в области закупки сырья круглого леса, координации производства и эффективного управления запасами. Были разработаны системы управления предприятиями для оптимизации цепочки поставок лесоматериалов. Разработанные информационные системы направлены на повышение эффективности управления запасами сырья, оптимизацию производственных процессов и укрепление координации на всех этапах производства. Кроме того, были интегрированы информационные технологии для более эффективного мониторинга и контроля запасов. В серии исследований [24, 29–32] целью было получить больше информации о степени влияния, преимуществах и проблемах использования социальных сетей в управлении обменом знаниями в цепочке поставок. Методология, использованная в этих работах, представляет собой систему обзора литературы с поисковыми базами данных Scopus и Google Scholar, опубликованными с 2014 по 2023 г. Результаты показывают, что платформы социальных сетей играют важную роль в маркетинге продуктов.

Цель работы

Цель работы — разработка математической модели, позволяющей принимать решения по формированию цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях неопределенности будущего предложения и внешних факторов ежедневно и отличающейся возможностью учета, технологии раскроя поступающего на производство круглого сырья и вероятного времени доставки до склада.

Материалы и методы

Рассмотрим процессы функционирования предприятия. В работе [21] затрагиваются следующие производственные процессы: формирование цепочек поставок сырья и объемы производства товаров.

Для определенности необходимо отметить источники поступления сырья на биржу. Биржа заключает договоры с арендаторами участков из регионов, где добывается сырье на продажу о том, что они могут пользоваться площадкой для торгов. После совершения сделки между предприятием по переработке сырья (лесопромышленным комплексом — заказчиком) и деляной (продавцом) заявленный в договоре объем сырья отправляется заказчику. Выкупить лот на бирже можно лишь целиком. В договоре купли-продажи указываются способы и цена доставки древесины. Доставка может осуществляться силами предприятия, однако далее мы будем рассматривать доставку сырья силами поставщика.

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

Математическая модель. Любая математическая модель описывается совокупностью параметров и переменных (таблица).

Лот состоит из бревен различных длины и диаметра. Предполагается, что часть бревен уйдет на переработку в дальнейших целях производства из полученных заготовок, а другая часть бревен (по причине либо слишком малой длины и/или диаметра, либо, слишком большого диаметра (длина не имеет значения)), уйдет на продажу на местный рынок. Для этого вводится две цены: $q_{km} = \text{const}$ и функция $p_{n^*(m)}(Len_{n^*})$.

Бревно n^* непригодно для дальнейшего производства тогда и только тогда, когда выполняется хотя бы одно из трех условий:

$$\min(\{len_n\}) > len_{n^*}; \quad (1)$$

$$\underline{d} > D_{n^*}; \quad (2)$$

$$D_{n^*} > \bar{d}; \quad (3)$$

Далее вводим два множества бревен (4)–(5): неподходящие (N_{irm}^-) и подходящие (N_{irm}^+) .

Параметры и переменные математической модели

Parameters and variables of the mathematical model

Наименование	Единицы измерения	Обозначение
<i>Параметры</i>		
Цена реализации на производимый товар типа k в день t	тыс. руб.	q_{km}
Цена лота i из региона r , появившаяся на бирже в день t	тыс. руб.	c_{irm}
Длина бревна n	м	len_n
Длина выходной заготовки под номером n	м	len_n
Длина номера, a для раскроя бруса	м	len_a
Максимальное рассматриваемое значение диаметра бревна для раскроя	м	\bar{d}
Минимальное рассматриваемое значение диаметра бревна для раскроя	м	\underline{d}
Диаметр бревна n	м	D_n
Количество рассматриваемых длин бревен	шт.	N
Множество бревен, доступных в день t	шт.	N_m^*
Количество лотов в день t в регионе r	шт.	$I(m, r)$
Количество регионов-источников сырья на бирже	ед.	R
Множество неподходящих к производству бревен из лота i из региона r в день t	—	N_{irm}^-
Множество подходящих к производству бревен из лота i из региона r в день t	—	N_{irm}^+
Функция цены на реализацию неподходящего к производству бревна номер n^* длиной Len_{n^*} в день t на внутреннем рынке, где находится предприятие	тыс. руб.	$p_{n^*(m)}(Len_{n^*})$
Количество бревен длиной Len_{nirm} из лота i из региона r в день t	ед.	Q_{nirm}
Карта раскроя бревна типа n (с длиной Len_n) на бруска длиной Len_a (e — номер варианта раскроя)	ед.	$A_{aen}^{(1)}(len_n, len_a)$
Норма выкройки заготовок типа j при раскрое бруса длиной Len_a	ед.	$A_{aj}^{(2)}$

Окончание таблицы

Наименование	Единицы измерения	Обозначение
Норма потребления заготовок типа j для производства единицы товара типа k	ед.	$A_{jk}^{(3)}$
Начальный бюджет	тыс. руб.	B_0
Постоянные издержки	тыс. руб.	FC
Горизонт планирования	дни	M
Время, за которое выкупленный в день t лот дойдет до склада	дни	$T_{r\tilde{m}}$
Расстояние от склада до региона r	км	L_r
Расстояние, пройденное заявкой в день t	км	S_m
Минимальное значение случайной величины, распределенной по равномерному закону	—	$left$
Максимальное значение случайной величины, распределенной по равномерному закону	—	$right$
Нормальное распределение случайной величины с параметрами (a_m, δ_m) в день t соответственно	—	$N(a_m, \delta_m)$
Вместимость склада	м ³	\bar{b}
Константа	—	$N^{(j)}$
Количество дней наперед, на которое планирует предприятие свою деятельность	дни	\tilde{T}
Величина спроса на товар типа k в день t	ед.	Q_{km}
Объем прибыли в день t	тыс. руб.	π_m
Переменные		
Объем производства товаров типа k в день t	шт.	x_{km}
Решение о покупке лота i из региона r , появившегося на бирже в день t	—	λ_{irm}
Запас заготовок типа j в день t	ед.	b_{jm}
Количество раскroенных бревен длиной len_n с типом раскроя e в день t	ед.	y_{enm}
Количество раскраиваемых брусков длиной len_a методом j в день t	ед.	z_{ajm}
Штрафная переменная	у.е.	$\varepsilon_m^{(j)}$

$$N_{irm}^- = \{n, len_{nirm}, Q_{nirm}^-\}; \quad (4)$$

$$N_{irm}^+ = \{n, len_{nirm}, Q_{nirm}^+\}. \quad (5)$$

$$\tilde{c}_{irm} = \sum \left(c_{irm} - \sum_{n \in N_{irm}^-} p_{n(m)} (len_n) \cdot Q_{nirm}^- \right) \lambda_{irm}. \quad (6)$$

Предлагается искать решение задачи $F_m^{(2,3)}$ последовательно при $m=1, M$. (6) отражает то, как считаются издержки. Целевая функция (7) направлена на максимизацию значения прибыли: $\sum q_{km} x_{km}$ — выручка от продажи произведенных товаров, \tilde{c}_{irm} — издержки.

Издержки состоят из разности суммы затрат на покупку сырья с товарно-сырьевой биржи $\sum c_{irm} \lambda_{irm}$ и суммы проданных неподходящих

бревен

$$\sum \left(\sum_{n \in N_{irm}^-} p_{n(m)} (len_n) \cdot Q_{nirm}^- \right) \lambda_{irm}.$$

Тут же в целевой функции присутствует вычитаемое $\sum_{j=1}^2 N^{(j)} \varepsilon_{m+t-1}^{(j)}$, которое в совокупности со следующими ограничениями и выражениями обуславливает находить решения, близкие к оптимальному.

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

Все раскroенные брусья в день t равны суммарному количеству выработанных заготовок разных типов в соответствии с нормой выработки $A_{aen}^{(1)}$, что отражает равенство

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

Все бревна, поступающие на склад через $\tilde{T}_{r\tilde{m}}$ дней, раскраиваются, согласно равенству

$$\sum_e y_{en(m+t-1)} = \sum_{i,r} Q_{nirm}^+ \lambda_{irm}. \quad (9)$$

Периоды, когда λ_{irm} переменная, а когда параметр, отражает выражение

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

где $\tilde{m} + \tilde{T}_{r\tilde{m}} = m + t - 1$, $t = 1, \min(\tilde{T}, M - m + 1)$, $\tilde{T}_{r\tilde{m}}$ — оценка предприятием времени, необходимого лоту из региона r , чтобы поступить на склад.

Рекуррентное соотношение запасов раскроенного материала на складе, задает выражение

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

Для того чтобы предприятие соблюдало бюджетное правило с ориентиром на расчетное значение прибыли, которое предприятие должно получить ко дню $m+t-1$, следует учитывать ограничение в совокупности с выражением (7)

$$\pi_{m-1} + \sum_{l=1}^t \left(\sum_k q_{k(m+l-1)} x_{k(m+l-1)} - \sum_{i,r} \tilde{c}_{ir(m+l-1)} \lambda_{ir(m+l-1)} - FC(m+l-1) \right) + \sum_{j=1}^2 (-1)^j \varepsilon_{m+t-1}^{(j)} \geq 0, \quad (12)$$

где $t = \overline{1, \min(\tilde{T}, M - m + 1)}$, $\pi_0 = B_0$.

Статистические исходные данные по сделкам на бирже не значительно изменяются с каждым годом. Кроме того, прибыль предприятия сильно не отличается от предыдущих периодов. Алгоритм поиска оптимального решения должен найти такое распределение переменных, которое бы удовлетворяло расчетам прогнозного объема раскроенного сырья на складе (целевая функция гарантирует стремление к этому значению). Правило расчета $\tilde{\pi}_m$ — ожидаемого накопленного объема прибыли, в день $t-1$ отражает выражение (13).

$$\pi_{m+t-1} = \begin{cases} \tilde{\pi}_m(\{V_{irm}\}_{i,r}, \{c_{irm}\}_{i,r}, m), & t=1 \\ \prod_{l=1}^t \tau(m+l) \cdot \tilde{\pi}_m(\{V_{irm}\}_{i,r}, \{c_{irm}\}_{i,r}, m), & m+t-1 < M, t \neq 1, \end{cases} \quad (13)$$

где $\tilde{\pi}_m = \tilde{\pi}_m(\{V_{irm}\}_{i,r}, \{c_{irm}\}_{i,r}, m)$,

$$\tau(m) = \begin{cases} \sum_{e=1}^E \frac{\pi_{m(e)}}{\pi_{m-1(e)}}, & m < M; \\ 0, & m = M. \end{cases}$$

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

$$\bar{b} \geq b_{j(m+t-1)} \geq 0. \quad (14)$$

Время нахождения товаров в пути рассчитывается по выражению.

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

с учетом

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

где $\check{a}_m, \check{\delta}_m$ — оценки матожидания и дисперсии предприятием.

Характер переменных описывают выражения:

$$0 \leq x_{km} \leq \min(Q_{km}, H_{km}); \quad (17)$$

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

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

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

Реализацию демонстрируют (все переменные становятся константами) подсчеты по уравнениям:

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

$$b_{jm} = b_{j(m-1)} - \sum_k A_{jk}^{(3)} x_{km} + \sum_a A_{aj}^{(2)} (len_a) z_{ajm}; \quad (22)$$

$$\sum_{e,n} A_{aen}^{(1)} y_{en(m+t-1)} = \sum_j z_{aj(m+t-1)}; \quad (23)$$

$$\sum_e y_{en(m+t-1)} = \sum_{i,r} Q_{nir\tilde{m}}^+ \lambda_{ir\tilde{m}}; \quad (24)$$

$$T_{r\tilde{m}} = m^* : \begin{cases} \left| L_r - \sum_{\underline{m}=\tilde{m}}^{m^*} S_{\underline{m}} \right| \rightarrow \min; \\ L_r - \sum_{\underline{m}=\tilde{m}}^{m^*} S_{\underline{m}} \leq 0, \end{cases} \quad (25)$$

где $\tilde{m} + T_{r\tilde{m}} = m$, а также учитывая, что

$$S_m \sim N(a_m, \delta_m), \quad (26)$$

где a_m, δ_m — реальные матожидание и дисперсия; $T_{r\tilde{m}}$ — реальное значение времени, которое потребуется лоту из региона r дойти до склада.

Перейдем на следующий день и решим задачу $F_{m+1}^{(2,3)}$. Решаем до тех пор, пока не будет выполняться равенство $m = M$.

Рассмотрим модель (7)–(26). Целевая функция (7) направлена на максимизацию значения прибыли: $p_{k(m+t-1)} x_{k(m+t-1)}$ — расчетный объем выручки от продажи произведенных товаров через t дней,

$\sum_{i,r} \tilde{c}_{ir(m+t-1)} \lambda_{ir(m+t-1)}$ — объем издержек через t дней.

Издержки состоят из разности суммы затрат на покупку сырья с товарно-сырьевой биржи $\sum c_{irm} \lambda_{irm}$ и суммы проданных бревен, длина которых не попадает под стандарт для дальнейшего раскроя (т. е. слишком короткие) —

$$\sum_{(n^* \in n^-)} p_{n^*m}^{(2)} (Len_{n^*}^-) N_{n^*irm}^- \lambda_{irm}.$$

Тут же в целевой функции присутствует слабое $-\sum_{j=1} N_{m+l-1}^{(j)} \varepsilon_{m+l-1}^{(j)}$, благодаря которому алго-

ритм оптимизации в совокупности с последующими ограничениями и выражениями находит решение, близкое к оптимальному. Согласно равенству (8), можно утверждать, что все раскроенные брусья в день t равны суммарному количеству выработанных заготовок разных типов в соответствии с нормой выработки $A_{aen}^{(1)}$. Согласно равенству (9), можно свидетельствовать, что все бревна, поступающие на склад через $T_{r\bar{m}}$ дней, раскраиваются.

В выражении (10) отражены периоды, когда λ_{irm} является переменной, а когда параметром. Рекуррентное соотношение запасов раскроенного материала на складе задается уравнением (11). Ограничение (12) призвано, чтобы предприятие соблюдало бюджетное правило. Правило расчета планируемого объема прибыли на $t-1$ дней вперед отражено в (13) и рассчитывается из гипотезы о том, что статистические выходные данные по работе предприятия не значительно меняются с каждым годом. Затем алгоритм поиска оптимального решения должен найти такое распределение переменных, которое бы удовлетворяло расчетам прогнозного объема раскроенного сырья на складе (целевая функция гарантирует стремление к этому

значению). (14) гарантирует, что на складе не будет отрицательного запаса сырья. Правила (15), (16) отражает предположение, в соответствии с которым рассчитывается время товаров в пути. Выражения (17)–(20) отражают характер переменных. Выражения (21)–(26) составляют картину того, как все получилось на практике.

Для тестирования модели использованы данные из работ [21–32]. Расчеты выполняли на языке программирования MatLab. Размерность задачи: свыше 60 000 переменных, свыше 30 000 ограничений. Время на поиск решения составило в пределах 2 ч. 13 мин. Оперативной памяти задействовано от 50 до 60 Гбайт в разное время работы модели.

Результаты и обсуждение

Разыграны по четыре сета значений $T_{r\bar{m}}, \check{T}_{r\bar{m}}$ для апробации разработанной модели ($e = 1, 4M$). Для каждого сета e были найдены решения. Рассмотрим результаты работы модели (рис. 1, 2).

Из рис. 1, 2 видно, что закуп сырья происходил на всем горизонте планирования. Вторым ресурс используется больше, поэтому его уровень в среднем выше, чем у первого. Отставание от оптимальной траектории прибыли связано с несколькими факторами:

- другими объемами производства;
- отличными от оптимальных закупками сырья.

Из рис. 3–6 видно, что объем производства не постоянен, а поскольку уже в самом начале планирования объемы производства ниже предельных, можно объяснить резкое начальное отставание от оптимальной линии прибыли.

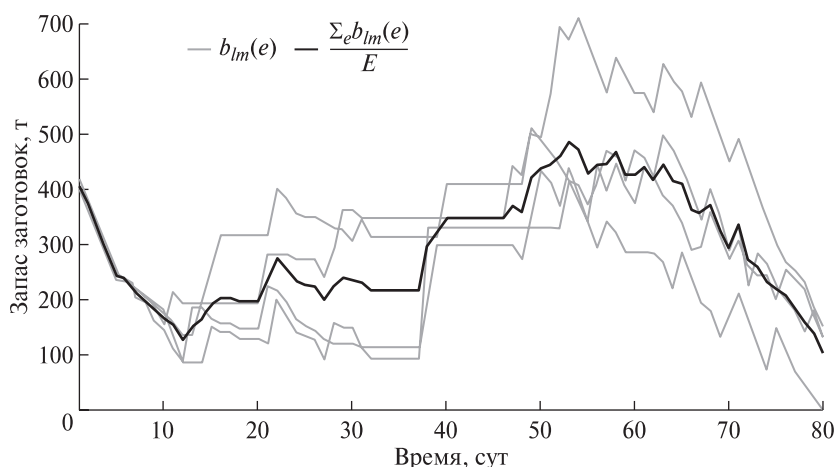


Рис. 1. Зависимость запаса заготовок типа $l = 1$ от времени

Fig. 1. The dependence of the stock of blanks of type $l = 1$ on time

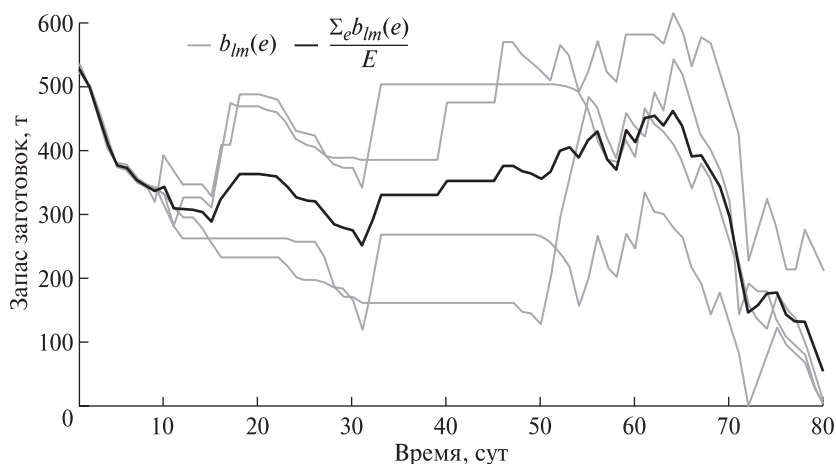


Рис. 2. Визуализация траектории запасов сырья типа $l = 2$ на складе

Fig. 2. Visualization of the trajectory of stocks of raw materials of type $l = 2$ in a warehouse

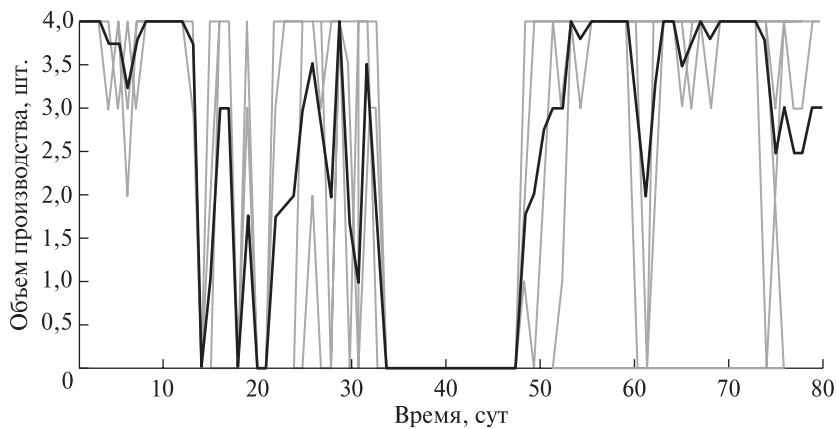


Рис. 3. Визуализация объемов производства товаров типа $k = 1$

Fig. 3. Visualization of the volume of production of goods of type $k = 1$

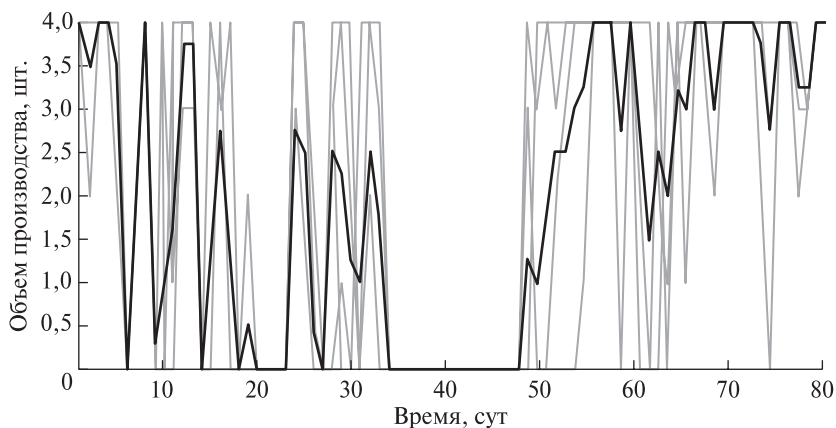


Рис. 4. Визуализация объемов производства товаров типа $k = 2$

Fig. 4. Visualization of the volume of production of goods of type $k = 2$

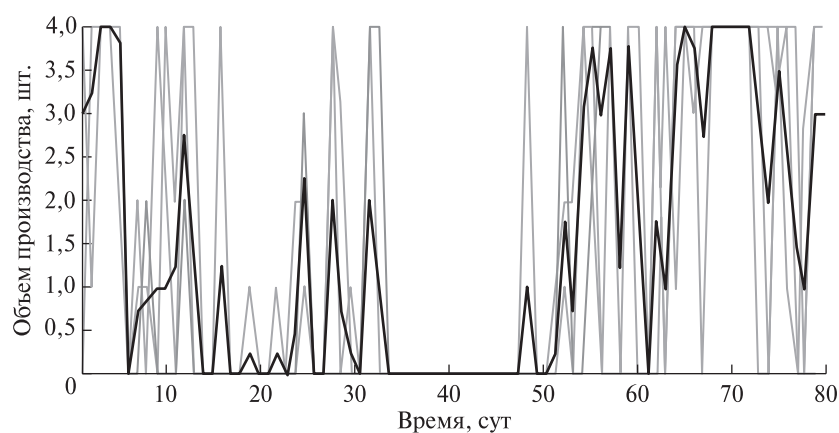


Рис. 5. Визуализация объемов производства товаров типа $k = 3$
Fig. 5. Visualization of production volumes of goods of type $k = 3$

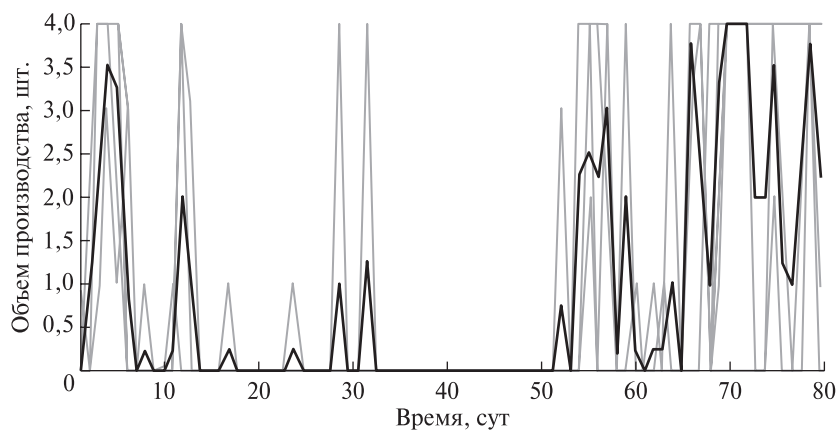


Рис. 6. Визуализация объемов производства товаров типа $k = 4$
Fig. 6. Visualization of production volumes of goods of type $k = 4$

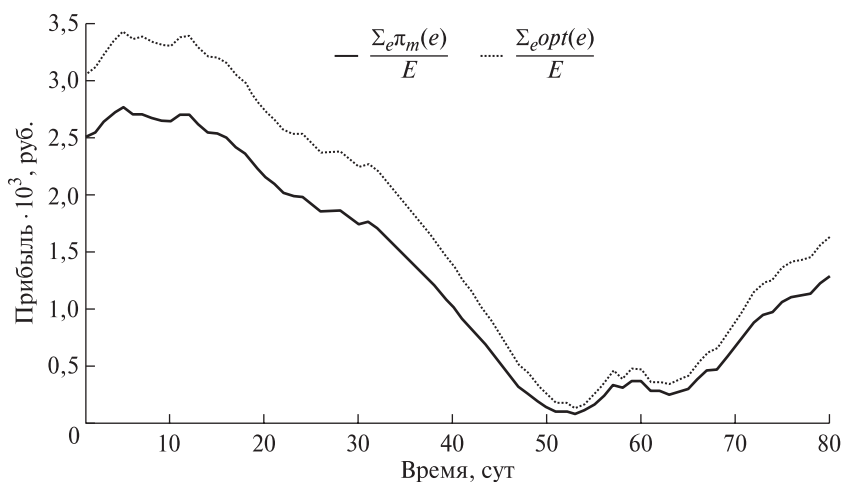


Рис. 7. Средние значения оптимальной и полученной прибыли
Fig. 7. The average values of the optimal and received profit

Для оценки эффективности разработанной модели была введена функция $opt(e)$, представляющая собой оптимальную линию прибыли на заданном наборе данных e (рис. 7). Анализ полученных траекторий позволяет сделать важный вывод: рассматриваемые периоды планирования оказались управленчески крайне сложными — даже при реализации оптимальных решений значение прибыли демонстрирует устойчивую тенденцию к снижению практически на всем протяжении планового горизонта. Это указывает на высокую степень неопределенности будущего предложения и нестабильности внешней среды, в которой функционирует предприятие, и подчеркивает практическую значимость задачи адаптивного управления.

Тем не менее, несмотря на неблагоприятные условия, разработанная модель продемонстрировала устойчивость и способность к генерации решений даже в наиболее сложных временных интервалах. В частности, интервал между 50-м и 65-м днем оказался критическим: в этот период даже оптимальное управление не обеспечивает значительный уровень прибыли, фиксируя фактически минимальные значения показателя за весь рассматриваемый плановый горизонт. Однако при этом, модель продолжает функционировать корректно, предлагая управленческие действия, которые позволяют избежать критических потерь и поддерживать стабильность в принятии решений.

Особенно примечательно, что по достижении конечного планового дня (80-й день) полученное с помощью модели решение приводит к уровню прибыли, лишь незначительно уступающему оптимальному. Это свидетельствует о том, что модель обладает свойством устойчивости к краткосрочным флуктуациям и может обеспечивать приемлемое качество решений в условиях высокой изменчивости параметров среды.

Вместе с тем сделанные выводы имеют определенные ограничения. В частности, рассматриваемый временной горизонт был сравнительно небольшим — всего 80 дней. Не исключено, что при увеличении горизонта планирования (например, до 300 дней, как это рассматривалось в работе [21]), или при использовании существенно иных входных данных, модель может продемонстрировать иную степень точности и устойчивости. В связи с этим важным направлением будущих исследований является проведение стресс-тестов модели на расширенных временных выборках, а также адаптация алгоритмов к работе с более разнообразными источниками неопределенности будущих предложений.

Выводы

Разработанная математическая модель, позволяет принимать эффективные управленческие решения в условиях неопределенности будущих предложений, связанных с закупками и переработкой сырья на лесоперерабатывающем предприятии. Модель направлена на решение прикладной задачи: определение субоптимальных, но устойчивых стратегий производства и формирования цепочек поставок древесного сырья с товарно-сырьевой биржи. Основная цель модели — обеспечить возможность ежедневного принятия решений о необходимых объемах закупок и переработки сырья, адаптируясь к изменяющимся рыночным и производственным условиям.

Предложенный подход отличается от традиционных моделей планирования учетом важной технологической особенности лесопереработки — специфики раскроя поступающего сырья. В рамках модели была реализована возможность моделирования трансформации сырья в полуфабрикаты и готовую продукцию с учетом технологических ограничений и коэффициентов выхода. Это приближает модель к реальным условиям производства и позволяет менеджменту предприятия учитывать технологическую целесообразность принимаемых решений.

Дополнительным преимуществом модели является ее пригодность для оперативного применения: она дает возможность принимать решения на ежедневной основе, что особенно важно в условиях нестабильных поставок, колебаний цен на бирже и других проявлений внешней неопределенности. Таким образом, модель можно рассматривать как инструмент оперативного планирования и адаптивного управления.

Кроме того, высокую устойчивость модели показали результаты тестирования на данных, приближенных к реальным производственным ситуациям. Даже в тех случаях, когда оптимальное управление в силу внешних ограничений не позволяет достичь высокой прибыли, разработанная модель генерирует решения, которые по эффективности лишь незначительно уступают оптимальным. Это подчеркивает ее применимость в реальных условиях, когда важна не только формальная оптимальность, но и практическая реализуемость решений. Модель может служить эффективным инструментом поддержки принятия решений на предприятии, снижая управленческие риски и способствуя стабильной работе в условиях рыночной неопределенности.

Список литературы

- [1] Abdollah B., Ghasemi P., Chobar A. P., Sasouli M. R., Lajevardi M. A New Wooden Supply Chain Model for Inventory Management Considering Environmental Pollution: A Genetic algorithm // *Foundations of Computing and Decision Sciences*, 2022, no. 47, pp. 83–408. DOI: 10.2478/fcds-2022-0021
- [2] Salehi-Amiri A., Akbapour N., Hajiaghaei-Keshteli M., Gajpal Y., Jabbarzadeh A. Designing an effective two-stage, sustainable, and IoT based waste management system // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, no. 157(2), p. 112031. DOI: 112031.10.1016/j.rser.2021.112031
- [3] Salehi-Amiri A., Zahedi A., Gholian-Jouybari F., Calvo E.Z.R., Hajiaghaei-Keshteli M. Designing a closed-loop supply chain network considering social factors; a case study on avocado industry // *Applied Mathematical Modelling*, 2022, no. 101, pp. 600–631. DOI: 10.1016/j.apm.2021.08.035
- [4] Daneshdoost F., Hajiaghaei-Keshteli M., Sahin R., Niroomand S. Tabu Search Based Hybrid Meta-Heuristic Approaches for Schedule-Based Production Cost Minimization Problem for the Case of Cable Manufacturing Systems // *Informatica*, 2022, no. 33(3), pp. 499–522. DOI: 10.15388/21-INFOR471
- [5] Chouhan V.K., Khan S.H., Hajiaghaei-Keshteli M. Sustainable planning and decision-making model for sugarcane mills considering environmental issues // *J. of environmental management*, 2022, no. 303(8), p. 114252. DOI: 114252.10.1016/j.jenvman.2021.114252
- [6] Mondal A., Roy S.K. Multi-objective sustainable opened-and closed-loop supply chain under mixed uncertainty during COVID-19 pandemic situation // *Computers & Industrial Engineering*, 2021, no. 159(4), p. 107453. DOI: 107453.10.1016/j.cie.2021.107453
- [7] Mondal A., Roy S.K., Midya S. Intuitionistic fuzzy sustainable multi-objective multi-item multi-choice step fixed-charge solid transportation problem // *J. of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2021, no. 14(3), pp. 1–25. DOI: 10.1007/s12652-021-03554-6
- [8] Midya S., Kumar Roy S., Wilhelm Weber G. Fuzzy multiple objective fractional optimization in rough approximation and its aptness to the fixed-charge transportation problem // *RAIRO-Operations Research*, 2021, 55(3), pp. 1715–1741. DOI: 10.1051/ro/2021078
- [9] Taleizadeh A.A., Shahriari M., Sana S.S. Pricing and Coordination Strategies in a Dual Channel Supply Chain with Green Production under Cap and Trade Regulation // *Sustainability*, 2021, no. 13(21), article ID 12232. DOI: 10.3390/su132112232
- [10] Barman A., Das R., De P.K., Sana S.S. Optimal pricing and greening strategy in a competitive green supply chain: Impact of government subsidy and tax policy // *Sustainability*, 2021, no. 13(16), article ID 9178.
- [11] Rana K., Singh S.R., Saxena N., Sana S.S. Growing items inventory model for carbon emission under the permissible delay in payment with partially backlogging // *Green Finance*, 2021, no. 3, pp. 153–174. DOI: 10.3934/GF.2021009
- [12] Sana S.S. A structural mathematical model on two echelon supply chain system // *Annals of Operations Research*, 2021, v. 315(2), pp. 1–29.
- [13] Salehi-Amiri A., Zahedi A., Akbapour N., Hajiaghaei-Keshteli M. Designing a sustainable closed-loop supply chain network for walnut industry // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, v. 141, article ID 110821. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110821
- [14] Chouhan V.K., Khan S.H., Hajiaghaei-Keshteli M. Metaheuristic approaches to design and address multi-echelon sugarcane closed-loop supply chain network // *Soft Computing*, 2021, no. 25, pp. 11377–11404. DOI: 10.1007/s00500-021-05943-7
- [15] Mosallanezhad B., Hajiaghaei-Keshteli M., Triki C. Shrimp closed-loop supply chain network design // *Soft Computing*, 2021, no. 11, pp. 7399–7422. DOI: 10.1007/s00500-021-05698-1
- [16] Hamdi-Asl A., Amoozad-Khalili H., Tavakkoli-Moghaddam R., Hajiaghaei-Keshteli M. Toward sustainability in designing agricultural supply chain network: A case study on palm date // *Scientia Iranica*, 2021. DOI: 10.24200/sci.2021.58302.5659
- [17] Fasihi M., Tavakkoli-Moghaddam R., Najafi S., Hajiaghaei M. Optimizing a bi-objective multi-period fish closed-loop supply chain network design by three multi-objective meta-heuristic algorithms // *Scientia Iranica*, 2021. DOI: 10.24200/sci.2021.57930.5477
- [18] Mosallanezhad B., Chouhan V.K., Paydar M.M., Hajiaghaei-Keshteli M. Disaster relief supply chain design for personal protection equipment during the COVID-19 pandemic // *Applied Soft Computing*, 2021, no. 112, p. 107809. DOI: 107809.10.1016/j.asoc.2021.107809
- [19] Mousavi R., Salehi-Amiri A., Zahedi A., Hajiaghaei-Keshteli M. Designing a supply chain network for blood decomposition by utilizing social and environmental factor // *Computers & Industrial Engineering*, 2021, v. 160(1), p. 107501. DOI: 107501.10.1016/j.cie.2021.107501
- [20] Zahedi A., Salehi-Amiri A., Hajiaghaei-Keshteli M., Diabat A. Designing a closed-loop supply chain network considering multi-task sales agencies and multi-mode transportation // *Soft Computing*, 2021, no. 8, pp. 6203–6235. DOI: 10.1007/s00500-021-05607-6
- [21] Рогулин Р.С. Математическая модель формирования цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях неопределенности // *Бизнес-информатика*, 2023. Т. 17. № 4. С. 41–56. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.41.5
- [22] Рогулин Р.С. Модель формирования лесопромышленных цепочек поставок сырья на склад с учетом особенностей // *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2023. № 4. С. 121–132.
- [23] Pratiwi S.J. Pemanfaatan scm pengolahan bahan baku produksi kayu di cv // *Interdisiplin Journal Social Science*, 2025, no. 1(1), pp. 25–32.
- [24] Al Kiramy R., Sari N., Putra Dieta D.W.D., Soleha A. Sosial media sebagai manajemen berbagi pengetahuan dalam rantai pasok // *RJOCS*, 2024, v. 10, no. 1, pp. 7–13.
- [25] Bekele A.A., Mahesh G., Ingle P.V. Enhancing SMCs' competitiveness through improving material supply chain management practice // *International J. of Construction Management*, 2024, no. 25(1), pp. 77–88.
- [26] Gomaa A.H. Boosting Supply Chain Effectiveness with Lean Six Sigma // *American J. of Management Science and Engineering*, 2024, no. 9(6), pp. 156–171.

- [27] Zhao J., Ji M., Feng B. Smarter supply chain: a literature review and practices // J. of Data, Information and Management, 2020, no. 2(2), pp. 95–110.
- [28] Zekhnini K., Cherrafi A., Bouhaddou I., Benghabrit Y., Garza-Reyes J. A. Supply chain management 4.0: a literature review and research framework // Benchmarking: An International J., 2021, no. 28(2), pp. 465–501.
- [29] Yazdi A.K., Hanne T., Osorio Gómez J.C. A hybrid model for ranking critical successful factors of Lean Six Sigma in the oil and gas industry // The TQM J., 2021, no. 33(8), pp. 1825–1844.
- [30] Yang S. Analysis for supply chain management: evidence from Toyota // BCP Business & Management, 2022, no. 34, pp. 1204–1209.
- [31] Yang M., Movahedipour M., Zeng J., Xiaoguang Z., Wang L. Analysis of Success Factors to Implement Sustainable Supply Chain Management Using Interpretive Structural Modeling Technique: A Real Case Perspective. Hindawi // Mathematical Problems in Engineering, 2017, no. 2017, pp. 1–14.
- [32] Trubetskaya A., McDermott O., Brophy P. Implementing a customised Lean Six Sigma methodology at a compound animal feed manufacturer in Ireland // International J. of Lean Six Sigma, 2023, no. 14(5), pp. 1075–1095.

Сведения об авторе

Рогулин Родион Сергеевич — канд. экон. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет», rafassiaofusa@mail.ru

Поступила в редакцию 27.05.2025.

Одобрено после рецензирования 27.08.2025.

Принята к публикации 30.09.2025.

MANAGEMENT OF THE FORESTRY PRODUCTION PROCESS TAKING INTO ACCOUNT EXTERNAL RISKS AND EXISTING EXPERIENCE FROM PREVIOUS PERIODS

R.S. Rogulin

Vladivostok State University, 41, Gogol st., 690014, Vladivostok, Russia

rafassiaofusa@mail.ru

A mathematical model for operational planning of a timber processing plant is presented. The problem of creating daily raw material supply chains from a commodity exchange and optimally utilizing production facilities is considered. Unlike existing approaches, the developed model allows for the consideration of raw material cutting technology and lot delivery times under uncertainty. Key output indicators are determined: the optimal profit trajectory over the planning horizon, daily production volumes, and raw material purchases. The model is tested using data from the Russian commodity exchange and a plant in Primorsky Krai. It is shown that even in complex scenarios, the model delivers significantly superior results and ensures stable planning. It is recommended for use to improve management efficiency at timber processing plants.

Keywords: formation of supply chains, forestry production companies, mathematical model, time of lots in transit

Suggested citation: Rogulin R.S. *Upravlenie lesopromyshlennym proizvodstvennym protsessom s uchetom vneshnikh riskov i imeyushchimsya opytom predydushchikh periodov* [Management of the forestry production process taking into account external risks and existing experience from previous periods]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 6, pp. 187–200. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-6-187-200

References

- [1] Abdollah B., Ghasemi P., Chobar A. P., Sasouli M. R., Lajevardi M. A New Wooden Supply Chain Model for Inventory Management Considering Environmental Pollution: A Genetic algorithm. *Foundations of Computing and Decision Sciences*, 2022, no. 47, pp. 83–408. DOI: 10.2478/fcds-2022-0021
- [2] Salehi-Amiri A., Akbapour N., Hajiaghahi-Keshteli M., Gajpal Y., Jabbarzadeh A. Designing an effective two-stage, sustainable, and IoT based waste management system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, no. 157(2), p. 112031. DOI: 112031.10.1016/j.rser.2021.112031

- [3] Salehi-Amiri A., Zahedi A., Gholian-Jouybari F., Calvo E.Z.R., Hajiaghahi-Keshteli M. Designing a closed-loop supply chain network considering social factors; a case study on avocado industry. *Applied Mathematical Modelling*, 2022, no. 101, pp. 600–631. DOI: 10.1016/j.apm.2021.08.035
- [4] Daneshdoost F., Hajiaghahi-Keshteli M., Sahin R., Niroomand S. Tabu Search Based Hybrid Meta-Heuristic Approaches for Schedule-Based Production Cost Minimization Problem for the Case of Cable Manufacturing Systems. *Informatica*, 2022, no. 33(3), pp. 499–522. DOI: 10.15388/21-INFOR471
- [5] Chouhan V.K., Khan S.H., Hajiaghahi-Keshteli M. Sustainable planning and decision-making model for sugarcane mills considering environmental issues. *J. of environmental management*, 2022, no. 303(8), p. 114252. DOI: 114252.10.1016/j.jenvman.2021.114252
- [6] Mondal A., Roy S.K. Multi-objective sustainable opened-and closed-loop supply chain under mixed uncertainty during COVID-19 pandemic situation. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, no. 159(4), p. 107453. DOI: 107453.10.1016/j.cie.2021.107453
- [7] Mondal A., Roy S.K., Midya S. Intuitionistic fuzzy sustainable multi-objective multi-item multi-choice step fixed-charge solid transportation problem. *J. of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2021, no. 14(3), pp. 1–25. DOI: 10.1007/s12652-021-03554-6
- [8] Midya S., Kumar Roy S., Wilhelm Weber G. Fuzzy multiple objective fractional optimization in rough approximation and its aptness to the fixed-charge transportation problem. *RAIRO-Operations Research*, 2021, 55(3), pp. 1715–1741. DOI: 10.1051/ro/2021078
- [9] Taleizadeh A.A., Shahriari M., Sana S.S. Pricing and Coordination Strategies in a Dual Channel Supply Chain with Green Production under Cap and Trade Regulation. *Sustainability*, 2021, no. 13(21), article ID 12232. DOI: 10.3390/su132112232
- [10] Barman A., Das R., De P.K., Sana S.S. Optimal pricing and greening strategy in a competitive green supply chain: Impact of government subsidy and tax policy. *Sustainability*, 2021, no. 13(16), article ID 9178.
- [11] Rana K., Singh S.R., Saxena N., Sana S.S. Growing items inventory model for carbon emission under the permissible delay in payment with partially backlogging. *Green Finance*, 2021, no. 3, pp. 153–174. DOI: 10.3934/GF.2021009
- [12] Sana S.S. A structural mathematical model on two echelon supply chain system. *Annals of Operations Research*, 2021, v. 315(2), pp. 1–29.
- [13] Salehi-Amiri A., Zahedi A., Akbapour N., Hajiaghahi-Keshteli M. Designing a sustainable closed-loop supply chain network for walnut industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, v. 141, article ID 110821. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110821
- [14] Chouhan V.K., Khan S.H., Hajiaghahi-Keshteli M. Metaheuristic approaches to design and address multi-echelon sugarcane closed-loop supply chain network. *Soft Computing*, 2021, no. 25, pp. 11377–11404. DOI: 10.1007/s00500-021-05943-7
- [15] Mosallanezhad B., Hajiaghahi-Keshteli M., Triki C. Shrimp closed-loop supply chain network design. *Soft Computing*, 2021, no. 11, pp. 7399–7422. DOI: 10.1007/s00500-021-05698-1
- [16] Hamdi-Asl A., Amoozad-Khalili H., Tavakkoli-Moghaddam R., Hajiaghahi-Keshteli M. Toward sustainability in designing agricultural supply chain network: A case study on palm date. *Scientia Iranica*, 2021. DOI: 10.24200/sci.2021.58302.5659
- [17] Fasihi M., Tavakkoli-Moghaddam R., Najafi S., Hajiaghahi M. Optimizing a bi-objective multi-period fish closed-loop supply chain network design by three multi-objective meta-heuristic algorithms. *Scientia Iranica*, 2021. DOI: 10.24200/sci.2021.57930.5477
- [18] Mosallanezhad B., Chouhan V.K., Paydar M.M., Hajiaghahi-Keshteli M. Disaster relief supply chain design for personal protection equipment during the COVID-19 pandemic. *Applied Soft Computing*, 2021, no. 112, p. 107809. DOI: 107809.10.1016/j.asoc.2021.107809
- [19] Mousavi R., Salehi-Amiri A., Zahedi A., Hajiaghahi-Keshteli M. Designing a supply chain network for blood decomposition by utilizing social and environmental factor. *Computers & Industrial Engineering*. 2021, v. 160(1), p. 107501. DOI: 107501.10.1016/j.cie.2021.107501
- [20] Zahedi A., Salehi-Amiri A., Hajiaghahi-Keshteli M., Diabat A. Designing a closed-loop supply chain network considering multi-task sales agencies and multi-mode transportation. *Soft Computing*, 2021, no. 8, pp. 6203–6235. DOI: 10.1007/s00500-021-05607-6
- [21] Rogulin R.S. *Matematicheskaya model' formirovaniya tsepochek postavok syr'ya s tovarno-syr'evoy birzhi v usloviyakh neopredelennosti* [Mathematical Model of Formation of Raw Material Supply Chains from a Commodity Exchange under Uncertainty]. *Biznes-informatika* [Business Informatics], 2023, v. 17, no. 4. pp. 41–56. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.41.5
- [22] Rogulin R.S. *Model' formirovaniya lesopromyshlennykh tsepochek postavok syr'ya na sklad s uchetom osobennostey* [Model of Formation of Forest Industry Raw Material Supply Chains to a Warehouse Taking into Account Specific Features]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information Technology and Computing Systems], 2023, no. 4, pp. 121–132.
- [23] Pratiwi S.J. Pemanfaatan scm pengolahan bahan baku produksi kayu di cv. Interdisiplin Journal Social Science, 2025, no. 1(1), pp. 25–32.
- [24] Al Kiramy R., Sari N., Putra Dieta D.W.D., Soleha A. Sosial media sebagai manajemen berbagi pengetahuan dalam rantai pasok. *RJOCS*, 2024, v. 10, no. 1, pp. 7–13.
- [25] Bekele A.A., Mahesh G., Ingle P.V. Enhancing SMCs' competitiveness through improving material supply chain management practice. *International J. of Construction Management*, 2024, no. 25(1), pp. 77–88.

- [26] Gomaa A.H. Boosting Supply Chain Effectiveness with Lean Six Sigma. *American J. of Management Science and Engineering*, 2024, no. 9(6), pp. 156–171.
- [27] Zhao J., Ji M., Feng B. Smarter supply chain: a literature review and practices. *J. of Data, Information and Management*, 2020, no. 2(2), pp. 95–110.
- [28] Zekhnini K., Cherrafi A., Bouhaddou I., Benghabrit Y., Garza-Reyes J. A. Supply chain management 4.0: a literature review and research framework. *Benchmarking: An International J.*, 2021, no. 28(2), pp. 465–501.
- [29] Yazdi A.K., Hanne T., Osorio Gómez J.C. A hybrid model for ranking critical successful factors of Lean Six Sigma in the oil and gas industry. *The TQM J.*, 2021, no. 33(8), pp. 1825–1844.
- [30] Yang S. Analysis for supply chain management: evidence from Toyota. *BCP Business & Management*, 2022, no. 34, pp. 1204–1209.
- [31] Yang M., Movahedipour M., Zeng J., Xiaoguang Z., Wang L. Analysis of Success Factors to Implement Sustainable Supply Chain Management Using Interpretive Structural Modeling Technique: A Real Case Perspective. *Hindawi. Mathematical Problems in Engineering*, 2017, no. 2017, pp. 1–14.
- [32] Trubetskaya A., McDermott O., Brophy P. Implementing a customised Lean Six Sigma methodology at a compound animal feed manufacturer in Ireland. *International J. of Lean Six Sigma*, 2023, no. 14(5), pp. 1075–1095.

Author's information

Rogulin Rodion Sergeevich — Cand. Sci. (Economic), Associate Professor of the Vladivostok State University, rafassiaofusa@mail.ru

Received 27.05.2025.

Approved after review 27.08.2025.

Accepted for publication 30.09.2025.