

Математическая модель планирования транспортно-технологического процесса поставок товарной древесины на базе «зеленых» технологий

И.М. Еналеева-Бандура^{1a}, А.Н. Баранов^{1b}, С.А. Бровкин^{1c}, О.А. Куницкая^{2d},
В.П. Друзьянова^{3e}, Е.В. Барышникова^{4f}

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, пр. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, Россия

² Арктический государственный агротехнологический университет, Сергеляхское шоссе, 3, Якутск, Республика Саха (Якутия)

³ Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, ул. Белинского, 58, Якутск, Республика Саха (Якутия)

⁴ Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А. Кортунова, ул. Пушкинская, 111, Новочеркасск, Россия

^a melnikov1978@inbox.ru, ^b aleksandr-baranov-55@mail.ru, ^c worbl@mail.ru, ^d ola.ola07@mail.ru,

^e druzvar@mail.ru, ^f barsoft@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1333-6285>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-6745-4523>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, ^e <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-1463-1319>

Статья поступила 30.10.2024, принята 11.11.2024

В статье обозначена необходимость учета экологической составляющей при планировании функционирования транспортно-технологического процесса поставок товарной древесины. Посредством анализа специализированной литературы по тематике исследования выявлено, что реализация подобного планирования осуществляется путем выработки оптимизационной модели, в основу которой положена комбинация методологии математического моделирования и инструментария «зеленых» технологий, способствующих учету экологических издержек, связанных с реализацией процесса транспортировки древесного сырья. В этой связи произведен детальный анализ существующих в современной научной литературе как подходов к созданию подобных методологических разработок, так и используемых в данных разработках «зеленых» технологий; посредством анализа выявлены недостатки и преимущества рассматриваемых подходов и созданных на их базе оптимизационных моделей. На основе произведенного анализа, опираясь на выявленные исследователями отношения и зависимости, разработан комплексный подход к планированию транспортно-технологического процесса поставок товарной древесины, в основе которого лежит поиск компромиссного оптимума между временем доставки, стоимостью транспортировки и экологическими издержками. Кроме того, в статье представлена разработанная математическая модель планирования транспортно-технологического процесса поставок товарной древесины с применением «зеленых» технологий, в основу которой, в качестве концептуального базиса, положен авторский комплексный подход. Предлагаемая математическая модель генерирует в себе как элементы модифицированной динамической «зеленой» транспортной задачи с задержками, так и инструментарий «зеленой» задачи маршрутизации, имеет многопродуктовый характер и многоиндексную постановку. Разработанная модель создана на основе методов экономико-математического моделирования, элементов динамического и приемов линейного программирования. Модель представлена аналитическим описанием целевой функции и системы ее ограничений. Разработанная модель обладает комплексным эколого-экономическим качественно-количественным критерием оптимальности инженерных решений в аспекте планирования процесса транспортировки товарной древесины. Также в статье обозначены преимущества выработанной модели и отмечена область применения предлагаемой методологической разработки.

Ключевые слова: транспортно-технологический процесс; товарная древесина; оптимизация; «зеленые» технологии; комплексный подход; математическая модель.

A mathematical model for planning the transport and technological process of commercial timber supplies based on «green» technologies

I.M. Enaleeva-Bandura^{1a}, A.N. Baranov^{1b}, S.A. Brovkin^{1c}, O.A. Kunitskaya^{2d},
V.P. Druzyanova^{3e}, E.V. Baryshnikova^{4f}

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarskii Rabochii Ave., Krasnoyarsk, Russia

² Arctic State Agrotechnological University; 3, Sergelyakhskoe Shosse, Yakutsk, Republic of Sakha

³ Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov; 58, Belinsky St., Yakutsk, Republic of Sakha

⁴ Novochechassk Engineering and Reclamation Institute named after A. Kortunov; 111, Pushkinskaya St., Novochechassk, Russia

^a melnikov1978@inbox.ru, ^b aleksandr-baranov-55@mail.ru, ^c worbl@mail.ru, ^d ola.ola07@mail.ru, ^e druzvar@mail.ru, ^f barsoft@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1333-6285>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-6745-4523>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, ^e <https://orcid.org/0000-0001-5409-3837>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-1463-1319>

Received 30.10.2024, accepted 11.11.2024

The article highlights the need to take into account the environmental component when planning the functioning of the transport and technological process of commercial timber supplies. Through the analysis of specialized literature on the subject of the study, it is revealed that the implementation of such planning is carried out by developing an optimization model based on a combination of mathematical modeling methodology and tools of "green" technologies that contribute to accounting for environmental costs associated with the implementation of the process of transporting wood raw materials. In this regard, a detailed analysis of existing approaches to the creation of such methodological developments in modern scientific literature, as well as those used in these developments of "green" technologies, has been carried out. The analysis reveals the disadvantages and advantages of the approaches under consideration and optimization models created on their basis. Based on the analysis performed, the relationships and dependencies are identified, an integrated approach to planning the transport and technological process of commercial timber supplies is developed, which is based on the search for a compromise optimum between delivery time, transportation cost and environmental costs. In addition, the article presents a developed mathematical model for planning the transport and technological process of commercial timber supplies using "green" technologies, which is based on the author's integrated approach as a conceptual basis. The proposed mathematical model generates both elements of a modified dynamic "green" transport problem with delays, and the toolkit of the "green" routing problem, has a multi-product character and a multi-index structure. The developed model is based on methods of economic and mathematical modeling, elements of dynamic and linear programming techniques. The model is represented by an analytical description of the objective function and its system of constraints. The developed model has a comprehensive ecological and economic qualitative and quantitative criterion for the optimality of engineering solutions in the aspect of planning the process of transporting commercial wood. The advantages of the developed model are also outlined in the article and the scope of the proposed methodological development is noted.

Keywords: transport and technological process; commercial timber; optimization; «green» technologies; integrated approach; mathematical model.

Введение. Транспортно-технологический процесс поставок товарной древесины от производителей до потребителей является одним из ключевых технологических процессов в лесной отрасли ввиду того, что данный процесс представляет собой связующее звено между производством и потенциальными потребителями древесного сырья. Общеизвестно, что реализация данного процесса наряду с обеспечением потребностей современного общества в древесном сырье оказывает существенное негативное воздействие на окружающую среду. Под отмеченным воздействием следует понимать, во-первых, нанесение ущерба лесным экосистемам при использовании первичного транспорта леса (изменение структуры почвы ввиду ее уплотнения, образования колеи и срыва почвенного покрова при осуществлении транспортно-технологических операций, а также изменение почвой своих растительных свойств и др.) [4; 5]; во-вторых, негативное воздействие на лесные экосистемы посредством строительства лесотранспортной сети (шумовое и вибрационное воздействие, пересечение путей миграции и т. п.); в-третьих, выбросы в атмосферу загрязняющих веществ, а также загрязнение водных объектов и почвы нефтепродуктами и противогололедными материалами при работе дорожно-строительных машин и транспорте леса [2; 6]. Соответственно, совокупность отмеченных факторов представляет собой экологический ущерб окружающей среде от реализации рассматриваемого процесса. Согласно источникам [21; 24], данный ущерб имеет накопительный эффект и может стать причиной экологически сложной обстановки. Учитывая данное обстоятельство, существует острая практическая необходимость поиска компромиссного оптимума между удовлетворением потребностей общества в древесных ресурсах и снижением экологического ущерба для

окружающей среды. В этой связи планирование функционирования транспортно-технологического процесса поставок товарной древесины как в России, так и за рубежом, с учетом экологической составляющей, что согласуется с реализацией концепции устойчивого управления лесами и лесопользованием, является одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед отраслью.

Объекты и методы исследования. Очевидно, что эффективным решением задачи поиска компромиссного оптимума между экономической составляющей и экологическими аспектами реализации процесса поставок товарной древесины является выработка действенного в практическом применении методологического аппарата, способствующего принятию качественных управленческих решений в рамках планирования данного технологического процесса на базе комплексного эколого-экономического критерия отмеченных решений.

В этой связи в научной литературе [3–10; 13; 18–24 и др.] как в России, так и в мире существует довольно значительное количество трудов по рассматриваемой проблематике.

В основном в данной литературе [3–10; 13; 18–24 и др.] существуют два вида моделей, оптимизирующих процесс транспортировки товарной древесины с учетом эколого-экономического критерия оптимальности в области планирования рассматриваемого процесса. Общность данных моделей обуславливается применением математического моделирования и так называемых «зеленых» технологий при создании модели транспортно-технологического процесса [1]. Соответственно, отмеченные технологии представляют собой учет экологических издержек при реализации процесса транспортировки. Различием данных моделей является их концептуальная постановка. В целях данной науч-

ной статьи рассмотрим эти концептуальные основы более детально.

В базисе первого подхода к созданию моделей, оптимизирующих процесс транспортировки с учетом экологической составляющей, лежит планирование транспортно-технологического процесса на основе «поиска кратчайших расстояний доставки от поставщика до потребителя». Т. е. оптимизация осуществляется путем рационального сокращения плеча доставки, при котором уменьшается общий пробег транспортных средств, тем самым сокращаются как количество выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, так и прочие перечисленные выше проявления негативного влияния работы транспорта на окружающую среду. Естественно, что при сокращении плеча транспортировки снижаются не только экологические издержки, но и финансовые, а также временные затраты на реализацию рассматриваемого процесса.

В основном при применении подобного подхода в аспекте оптимизации процесса транспортировки ключевым инструментом реализации «зеленой» технологии планирования процесса поставок является «зеленая транспортная задача». Отличие «зеленой» транспортной задачи от ее классической постановки заключается в учете негативного воздействия транспорта на окружающую среду. Т. е. при решении данного класса задач определяется компромиссный оптимум между экономическими затратами и экологическими издержками, связанными с процессом транспортировки. Примером подобного моделирования являются методологические аппараты оптимизации процесса транспортировки, представленные в источниках [7–9]. Аналитическая постановка моделей, приведенных в указанных источниках, также напоминает математическую модель классической транспортной задачи с той лишь разницей, что целевая функция рассматриваемой модели, вместо расчета минимальных финансовых затрат на транспортировку, содержит вычисление минимального ущерба окружающей среде. Т. е. в расчетной формуле классической транспортной задачи присутствует показатель стоимости перевозки на единицу продукции, в «зеленом» же аналоге данной задачи вместо указанного показателя принимается ущерб окружающей среде на единицу транспортируемой продукции (расчет выбросов в атмосферу загрязняющих веществ транспортными средствами в стоимостном выражении). Основными преимуществами подобного моделирования являются простота в применении рассматриваемых моделей, обусловленная линейностью входящих в аналитическую постановку этих методологических аппаратов показателей; доступность получения экспериментальных данных; возможность определения наиболее эффективной транспортно-технологической схемы транспортировки. Среди недостатков данных моделей можно отметить следующие, основные из них: детерминированная постановка задачи, а также учет в расчете негативного воздействия на окружающую среду только вред от эксплуатации автомобильного транспорта, а именно эмиссии CO₂ в атмосферу. Хотя очевидно, что функционирование процесса транспортировки облада-

ет пространственно-временной динамикой, соответственно, основные показатели отмеченного функционирования не являются статичными, но подвержены изменениям. Относительно учета лишь эмиссии CO₂ в атмосферу посредством эксплуатации в процессе транспортировки автомобильного транспорта можно отметить следующее. По нашему мнению, подобный учет не является достоверным, поскольку транспортировка в более чем 80 % случаев осуществляется двумя и более видами подвижного состава. Учитывая данное обстоятельство, пренебрежение учетом негативного воздействия на окружающую среду иных видов транспортных средств, используемых в рассматриваемом процессе, искажает результаты отмеченных вычислений, так как экологичность железнодорожного и водного транспорта леса не приближена к 100%. Также достоверность результатов вычислений при использовании анализируемых моделей снижает учет в них только эмиссии CO₂ в атмосферу, поскольку на практике в аспекте реализации процесса транспортировки CO₂ не единственное загрязняющее вещество, наносящее существенный вред окружающей среде. Касательно второго подхода к созданию моделей, оптимизирующих процесс транспортировки с учетом экологической составляющей, можно отметить то, что в его основу положена организация смешанной транспортировки, использование в которой неблагоприятных с экологической точки зрения видов транспорта леса максимально сокращено. Следует отметить, что, согласно источникам [1–10; 13; 18–24 и др.], наиболее неблагоприятным с позиции экологии является автомобильный транспорт, а более экологичным — железнодорожный. По данным источника [2], выбросы загрязняющих веществ в атмосферу при использовании автомобильного транспорта на 10 км пути составляют в среднем около 10,9 кг, при реализации смешанной транспортировки на тот же километраж приходится 1,3 кг загрязняющих веществ. В этой связи при реализации рассматриваемого подхода «зеленой» технологией является оптимизация планирования процесса транспортировки путем комбинирования различных видов транспорта леса с рациональным снижением доли применения в ней автомобильного транспорта. Результатом реализации данной «зеленой» технологии является проект транспортных сетей с учетом осуществления транспортировки товарной древесины двумя и более видами транспорта леса без увеличения транспортных издержек для потенциального потребителя. Основным инструментом планирования подобных сетей является задача «зеленой» маршрутизации транспортных средств как в детерминированной, как и в стохастической постановке. Математические модели, созданные на базе данного подхода, представлены в источниках [11; 12; 14–17]. Аналитическая постановка моделей, приведенных в отмеченных источниках, в основном аналогична классической задаче «коммивояжера». Как существенное преимущество данных методологических разработок можно обозначить то, что они имеют достаточно широкий спектр применения, т. е. данные модели подходят для решения различных частных за-

дач маршрутизации. Недостатками рассматриваемых моделей являются малая возможность использования для решения задач больших размерностей; пренебрежение учетом многоассортиментности материального потока; достаточно трудоемкий процесс получения экспериментальных данных.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что существующие в современной научной литературе [3–10; 13; 18–24 и др.] подходы к моделированию процесса транспортировки товарной древесины с учетом применения «зеленых» технологий в аспекте планирования данного процесса имеют свои как бесспорные преимущества, так и весомые недостатки. По нашему мнению, существует объективная возможность повышения преимущественных свойств подобной модели наряду со снижением ее недостатков посредством консолидации наиболее существенных для рассматриваемого процесса преимуществ и отраслевого подхода к объекту моделирования (т. е. учету при создании модели основных факторов, оказывающих наибольшее влияние на функциониро-

вание процесса транспортировки товарной древесины). Опираясь на обозначенное обстоятельство, применительно к моделированию транспортно-технологического процесса поставок товарной древесины нами предлагается комплексный подход на базе эколого-экономического качественно-количественного критерия оптимальности планирования функционирования указанного процесса (см. рисунок).

Представленный на рисунке авторский комплексный подход к планированию транспортно-технологического процесса поставок товарной древесины способен обеспечить созданной на его основе методологической разработке возможность более полного и достоверного расчета эколого-экономического ущерба окружающей среде в аспекте функционирования рассматриваемого процесса; осуществление планирования эффективного плеча транспортировки по видам используемого транспорта леса; возможность определения точки компромиссного оптимума между финансовыми, временными и экологическими издержками.



Рис. Комплексный подход к планированию транспортно-технологического процесса поставок товарной древесины на базе «зеленых» технологий

Результаты и их обсуждение. Исходя из результатов анализа научной литературы по обозначенной проблематике [1–24 и др.] и используя в качестве концептуальных основ авторский комплексный подход, нами выработана математическая модель, адекватная технологическим отношениям и производственным связям в системе «поставщик – транспорт – лесной склад –

транспорт – потребитель» с учетом экологической составляющей функционирования объекта моделирования в производственной среде.

Далее нами приводится разработанная математическая модель планирования транспортно-технологического процесса поставок товарной древесины на базе

«зеленых» технологий с применением разработанного комплексного подхода.

Целевая функция авторской модели задается условием минимизации как совокупных финансовых издержек ($Z_{\text{сум}}$), так и временных затрат ($t_{ijk}^{\text{сум}}_{\text{норм}}$), а также эколого-экономического ущерба окружающей среде ($C_{\text{ущ}}$), связанных с реализацией процесса транспортировки товарной древесины:

$$\begin{cases} Z_{\text{сум}} = Z_{\text{дс}} + Z_{\text{дп}} + Z_{\text{хр}} + Z_{\text{н}}, \\ t_{ijk}^{\text{сум}}_{\text{норм}} = \sum_{t=0}^T \sum_{k=1}^K \sum_{l=0}^{L_{\text{дост}}} l_k(t) / v_k^{\text{ср}}(t), \\ C_{\text{ущ}} = C_{\text{ущ}}^{\text{ср}} + \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K C_{\text{норм}}^{\text{тр}} \cdot m_r(t) \cdot l_k \rightarrow \min \end{cases} \quad (1)$$

где $Z_{\text{дс}}$ — затраты на вывозку однородного потока товарной древесины с лесосеки на лесной склад (данный показатель не рассчитывается для условий прямой вывозки при сортиментной технологии заготовки древесного сырья ввиду отсутствия таких структурных единиц, как лесные склады, в рассматриваемой цепи поставок товарной древесины и наличия, начиная с верхнего лесного склада, многоассортиментности лесного продукта) в период времени $t, p.$; $Z_{\text{дп}}$ — затраты на доставку многопродуктового потока древесного сырья с лесного склада до потребителя (данный показатель рассчитывается в зависимости от транспортно-технологической схемы вывозки древесного сырья, т. е. затраты рассчитываются по каждому структурному элементу цепи поставок (промежуточный сезонный склад, нижний склад, прирельсовый участок и т. п.) и, соответственно, суммируются по видам товарной древесины в период времени $t, p.$; $Z_{\text{хр}}$ — затраты на хранение реализованного потребителю не в нормативное время объема древесного сырья плюс омертвление актива поставщика (недополучение прибыли за время нереализации) по видам товарной древесины в период времени $t, p.$; $Z_{\text{н}}$ — затраты от недопоставки древесного сырья у потребителя в случае, если поставка осуществлена позже нормативного времени, во временной период $t, p.$; t — период времени, $t \in \{0, \dots, T\}$; i — пункт производства, $i \in \{1, \dots, m\}$; j — пункт потребления (дилер, оптовый посредник и т. п., $j \in \{1, \dots, n\}$; k — вид транспорта леса, в зависимости от транспортно-технологической схемы вывозки (вид лесотранспорта при вывозке однородного потока товарной древесины с лесосеки до лесного склада преимущественно автомобильный), $k \in \{1, \dots, K\}$; $C_{\text{ущ}}$ — оценка ущерба окружающей среде, возникающего посредством создания лесовозных транспортных путей, а также эксплуатации как данных путей, так и подвижного состава на лесовозных дорогах и на дорогах общего пользования, в период времени $t, p.$; $C_{\text{норм}}^{\text{тр}}$ — нормативная оценка экономического ущерба от загрязнения окружающей среды при движении k -го транспорта леса по маршруту доставки на 1 км в период времени $t, p./т.$; m_r — масса r -го вида загрязняющих веществ при движении k -го транспорта леса по маршруту доставки на 1 км (масса r -го вида загрязняющих веществ определяется согласно

источнику [7]) в период времени $t, m, r \in \{1, \dots, R\}$; $C_{\text{ущ}}^{\text{ср}}$ — экономический ущерб окружающей среде, связанный со строительством транспортных путей на территории лесного фонда (загрязнение атмосферного воздуха в результате работы двигателей строительно-дорожной техники; негативное влияние шума, пыли, вибраций и электромагнитных полей на лесные экосистемы и пр.). Данный показатель нами предлагается определять согласно источникам [4; 5; 7; 18; 19]; $L_{\text{дост}}$ — протяженность маршрута доставки в период времени $t, км.$; $t_{ijk}^{\text{сум}}_{\text{норм}}$ — нормативное время доставки товарной древесины потенциальному потребителю; l_k — расстояние доставки товарной древесины k -м транспортом леса по элементам маршрута доставки (ус, ветка, магистраль, дорога общего пользования, ж/д пути и др.), в период времени $t, км.$ Соответственно, $\sum l_k = L_{\text{дост}}$; $v_k^{\text{ср}}$ — среднетехническая скорость k -го транспорта леса по элементам маршрута доставки (ус, ветка, магистраль, дорога общего пользования, ж/д пути и др.), в период времени $t, км/ч.$

Затраты на вывозку однородного потока товарной древесины с лесосеки на верхний лесной склад определяются согласно выражению (2):

$$Z_{\text{дс}} = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^m \sum_{b=1}^B \sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^K [\Pi_i(t) + C_{ijk}^{\text{тр}}(t) + C_{ijk}^{\text{тех}}(t)] \cdot X_{ijk}(t), \quad (2)$$

где Π_i — средневзвешенная стоимость транспортируемой товарной древесины в период времени $t, p./м^3$; $C_{ijk}^{\text{тр}}$ — расходы, связанные с транспортировкой с b -й лесосеки k -м транспортом леса товарной древесины на g -й лесной склад в период времени $t, p./м^3$, $g \in \{1, \dots, G\}$, $b \in \{1, \dots, B\}$; $C_{ijk}^{\text{тех}}$ — производственные расходы, связанные с применяемой технологией работ на g -м верхнем лесном складе в период времени $t, p./м^3$; X_{ijk} — объем поставки товарной древесины на g -й верхний лесной склад в период времени $t, м^3$.

Если транспортировку однородного потока товарной древесины предполагается осуществлять с верхнего лесного склада на нижний или промежуточный (сезонный) склад, то, соответственно, в выражение (2) необходимо включить как затраты на транспортировку древесного сырья с верхнего на нижний или промежуточный (сезонный) склад, так и производственные расходы, связанные с применяемой технологией работ на отмеченных складах.

Затраты на доставку многопродуктового потока древесного сырья с лесного склада до потребителя определяются согласно выражению (3):

$$Z_{\text{дп}} = \sum_{t=0}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^m \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^D [\Pi_i^d(t) + C_{ij}^{\text{тр}^d}(t) + C_{ij}^{\text{тех}^d}(t)] \cdot X_{ijk}^d(t), \quad (3)$$

где Π_i^d — цена реализации d -го вида лесного продукта у i -го поставщика в период времени $t, p./м^3$; $C_{ij}^{\text{тр}^d}$ — транспортные расходы на доставку d -го вида товарной древесины j -му потребителю в период времени $t, p./м^3$; $C_{ij}^{\text{тех}^d}$ — производственные расходы, связанные с применяемой технологией работ на лесном складе, с

которого осуществляется отгрузка d -го вида товарной древесины j -му потребителю в период времени $t, p./M^3$; d — вид товарной древесины, $d \in \{1, \dots, D\}$; X_{ijk}^d — объем поставки d -го вида товарной древесины j -му потребителю в период времени t, M^3 .

Формула по определению затрат на хранение реализованного потребителю не в нормативное время объема товарной древесины имеет следующий вид:

$$Z_{xp} = \sum_{t=0}^T \sum_{d=1}^D \sum_{i^g=1}^G [C_i^{*k}(t) + \Pi_i^k \cdot \Delta t^k(t)] \cdot U_i^k(t), \quad (4)$$

где C_i^{*k} — затраты на хранение d -го вида товарной древесины на g -м лесном складе в период времени $t, p./M^3$; Π_i^k — омертвление актива i -го поставщика ввиду нереализации d -го вида древесного сырья в период времени $t, p./M^3$; Δt^k — время хранения d -го вида товарной древесины во временной период $t, дней$; U_i^k — объем запаса d -го вида товарной древесины в период времени t, M^3 .

Затраты от недопоставки древесного сырья у потребителя, в случае если поставка осуществлена позже нормативного времени, определяются согласно выражению (5):

$$Z_n = \sum_{t=0}^T \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_j^{dk}(t) \cdot X_{ijk}^{dk}(t) \cdot t^{dk}(t), \quad (5)$$

где C_j^{dk} — ущерб, вызванный сбоем производственной программы у j -го потребителя, связанный с недопоставкой либо поставкой d -го вида древесного сырья позже нормативного времени, во временной период $t, p./M^3$; X_{ijk}^{dk} — опаздывающий объем d -го вида товарной древесины, доставляемый k -м транспортом леса j -му потребителю в период времени t, M^3 ; Δt^{dk} — время опоздания поставки d -го вида товарной древесины k -м транспортом леса j -му потребителю в период времени $t, дней$.

Реализация разработанной математической модели имеет следующие ограничения:

1. Статического баланса объемов поставщиков, складов и потребителей:

$$\begin{aligned} \sum_{t=0}^T \sum_{i^b=1}^B \sum_{i^g=1}^G \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D a_{ig}(t) = \\ \sum_{t=0}^T \sum_{i^b=1}^B \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^D \sum_{i^g=1}^G e_{ig}(t) = \\ \sum_{t=0}^T \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^n \sum_{i^g=1}^G b_{jg}(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где a_{ig} — объем поставки d -го вида товарной древесины с b -й лесосеки i -го поставщика на g -й склад k -м видом транспорта леса в период времени t, M^3 ; b_{jg} — объем потребления d -го вида товарной древесины у j -го потребителя при доставке склад k -м видом транспорта леса с g -го лесного склада в период времени t, M^3 ; e_{ig} — объем переработки запаса по D видам товарной древесины (емкость) g -го склада в период времени t, M^3 .

2. Динамической связи поставщиков, складов и потребителей:

$$\begin{aligned} X'_{ib}(t) = X''_{ib}(t + t_{ig}) = X'''_{ig}((t + t_{ig}) + t_{ieg}) = \\ X''''_{ig}(((t + t_{ig}) + t_{ieg}) + t_{jg}), \end{aligned} \quad (7)$$

где X'_{ib} — объем d -го вида товарной древесины, отправленный на g -й лесной склад в период времени t, M^3 ; X''_{ib} — объем d -го вида продукции, прибывшей на g -й лесной склад в период времени $(t + t_{ig}), M^3$; X'''_{ig} — объем d -го вида продукции, переработанный g -м складом в период времени $((t + t_{ig}) + t_{ieg}), M^3$; X''''_{ig} — объем d -го вида продукции, прибывший потребителю с g -го лесного склада в период времени $((t + t_{ig}) + t_{ieg}) + t_{jg}), M^3$; t_{ig} — нормативное время доставки на g -й лесной склад, *дней*; t_{ieg} — нормативное время складской обработки, *дней*; t_{jg} — нормативное время доставки до j -го потребителя, *дней*.

3. Динамики запасов потребителей и поставщиков:

$$\begin{aligned} U_i(t + 1) = U_i(t) + \\ \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D \sum_{i^g=1}^G \sum_{i^b=1}^B X_{ig}(t) - \\ \sum_{t=0}^T \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^n \sum_{i^g=1}^G b_{jg}(t) \end{aligned} \quad (8)$$

где U_i — общий объем по D видам лесных продуктов i -го поставщика, производственная возможность, M^3 ; X_{ig} — объем d -го вида товарной древесины, прибывающей с b -й лесосеки k -м транспортом леса на g -й лесной склад в период времени t, M^3 .

4. Динамического баланса производства и потребления:

$$\begin{aligned} \sum_{t=0}^t \sum_{i^b=1}^B \sum_{i^g=1}^G \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D a_{ig}(t) = \\ \sum_{t=0}^{((t+t_{ig})+t_{ieg})} \sum_{i^b=1}^B \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^D \sum_{i^g=1}^G e_{ig}(t) = \\ \sum_{t=0}^{((t+t_{ig})+t_{ieg})+t_{jg}} \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^n \sum_{i^g=1}^G b_{jg}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

5. Естественной не отрицательности грузопотоков и запасов:

$$X_{ijk}^d(t) \geq 0; X_{ijk}^{dk}(t) \geq 0; X'_{ib}(t) \geq 0$$

$$X''_{ib}(t + t_{ig}) \geq 0$$

$$X'''_{ig}((t + t_{ig}) + t_{ieg}) \geq 0$$

$$X''''_{ig}(((t + t_{ig}) + t_{ieg}) + t_{jg}) \geq 0$$

$$U_i \geq 0; i \geq 0; t \geq 0; j \geq 0; b \geq 0; g \geq 0; d \geq 0; k \geq 0$$

$$l_k \geq 0; v_k^{cp} \geq 0; r \geq 0; m_r \geq 0 \quad (10)$$

6. Невозможности осуществления поставки товарной древесины потенциальному потребителю одним видом транспорта леса:

$$l_k < L_{\text{дост}}. \quad (11)$$

Необходимость ввода данного ограничения обусловлена, прежде всего, целью создания данной модели, а именно поиском пути оптимизации процесса доставки товарной древесины потенциальному потребителю в условиях использования двух и более видов транспорта леса.

7. Рациональности планирования плеча доставки товарной древесины:

$$L_{\text{дост}} \leq L_{\text{эк}}, \quad (12)$$

где $L_{\text{эк}}$ — целесообразное с экономической позиции расстояние доставки, км. Также данное ограничение можно обозначить как учет в предлагаемой модели уровня развития лесотранспортной сети, посредством

которого обеспечивается транспортная доступность мест заготовки древесного сырья.

8. Соответствия требованиям нормативно-правовой базы в области строительства лесовозных транспортных путей и эксплуатации транспорта леса [25–27 и др.]:

$$C_{\text{ущ}}^{\text{норм}} > C_{\text{ущ}}, \quad (13)$$

где $C_{\text{ущ}}^{\text{норм}}$ — допустимый (нормативный) ущерб окружающей среде, возникающий посредством создания лесовозных транспортных путей, а также эксплуатации как данных путей, так и подвижного состава на лесовозных дорогах и на дорогах общего пользования в период времени t, p .

Разработанная математическая модель дает возможность планирования наиболее действенных в практике транспортно-технологических схем реализации процесса поставок товарной древесины с учетом использования преимуществ различных видов транспорта леса.

Выводы. Предлагаемая математическая модель планирования транспортно-технологического процесса поставок товарной древесины на базе «зеленых» технологий способна обеспечить определение точки компромиссного оптимума между финансовыми, временными и экологическими издержками, возникающими при реализации данного процесса посредством:

Литература

1. Набор инструментов для «зеленой» логистики // Междунар. доставка DHL Express. URL: <https://express.dhl.ru/business/export-online-stores/sovety-v-oblasti-elektronnoy-torgovli/nabor-instrumentov-dlya-zelenoy-logistiki/> (дата обращения: 03.09.2024).
2. Каково влияние транспорта на окружающую среду? // Зеленая химия. PCC Greenline блог. URL: <https://www.products.pcc.eu/ru/> (дата обращения: 03.09.2024).
3. Григорьев И.В., Тихонов И.И., Григорьева О.И., Рудов М.Е. Поиск новых технических решений для повышения экологической совместимости лесных машин с лесной средой // Интенсификация формирования и охраны интеллектуальной собственности: материалы республиканской науч.-практической конф., посвящ. 75-летию ПетрГУ. (15-16 мая 2015 г.). Петрозаводск, 2015. С. 9-11.
4. Кручинин И.Н. Роль транспортно-производственной системы лесного комплекса в системе устойчивого лесопользования // Symposium forest.ru. URL: http://symposium.forest.ru/article/2010/5_safety/Kruschinin.htm (дата обращения: 03.09.2024).
5. Кручинин И.Н. Влияние системы транспорта леса на окружающую среду // Состояние и перспективы транспорта. Обеспечение безопасности дорожного движения: материалы междунар. науч.-технической конф. к 30-летию автодорожного факультета Пермского гос. технического ун-та (16-17 апр. 2009 г.). Пермь, 2009. С. 161-166.
6. Григорьев И.В., Григорьева О.И. Основные направления обеспечения экологической безопасности лесозаготовительного производства // Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-1 (13-1). С. 202-205.
7. Абрамова И.О., Муртазина М.Ш. Зеленая транспортная логистика как инструмент совершенствования хозяйственной деятельности транспортных компаний // Вестн. Евразийской науки. 2018. № 3. URL: <https://esj.today/> (дата обращения: 03.09.2024).
8. Шаталова Е.Е. Совершенствование оценки массовых выбросов загрязняющих веществ в отработавших газах автомобильного транспорта: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10. Волгоград, 2007. 16 с.
9. Krivoshapkina O., Yakovleva A., Zakharova A., Pavlova A., Eroshenko V., Gogoleva P., Tikhonov E., Kunickaya O. Environmental safety of residents of Yakutsk and Zhatay: evidence from sociological research // Journal of Environmental Studies and Sciences. 2022. Vol. 12, № 3. P. 566-576.
10. Кузнецов А.В., Скрыпник В.И., Васильев А.С., Шегельман И.Р. Возможности эффективного решения технико-экономических инженерных задач при планировании и оптимизации работы транспорта леса // Инженерный вестн. Дона. 2017. № 2 (45). С. 62.
11. Беляков С.Л., Белякова М.Л., Боженюк А.В., Савельева М.Н. Оптимизация потоков в транспортных системах // Изв. ЮФУ. Технические науки. Раздел III. Моделирование сложных систем. 2014. № 5. С. 161-167.
12. Иванников В.А. Совершенствование системы формирования грузопотоков лесоматериалов на смежных видах транспорта: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2019. 36 с.
13. Григорьев И.В., Григорьева О.И. Повышение экологической эффективности лесохозяйственного производства // Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 3-4 (8-4). С. 51-55.
14. Стороженко С.С. Повышение эффективности транспортно-технологического процесса лесопромышленных предприятий на базе логистики - математических моделей: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2003. 210 с.
15. Лавриков И.Н., Сыщиков Д.А., Тарабрин Д.А. Проблемы организации смешанных перевозок в России // Наука через призму времени. 2018. № 2 (11). С. 43-46.
16. Костров В.Н. Логистика смешанных перевозок: моногр. Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2020. 124 с.

17. Кривошеев А.Ю. Логистические проблемы развития смешанных перевозок // Изв. С.-Петерб. гос. экон. ун-та. 2015. № 3 (93). С. 130-134.
18. Грибанов И.Ю. Оценка воздействия на окружающую среду при строительстве и эксплуатации лесовозной дороги в Приморском крае [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vozdeystviya-na-okruzhayuschuyu-sredu-pri-stroitelstve-i-ekspluatatsii-lesovoznoy-dorogi-v-primorskom-krae/viewer> (дата обращения: 05.09.2024).
19. Еналеева-Бандура И.М., Ковалев Р.Н., Баранов А.Н., Шишоркин Н.Н. Модели и методы эколого-экономической оценки продуктивности лесных территорий с учетом уровня развития транспортной сети: моногр. Красноярск, 2022 162 с.
20. Duan X. Green logistic network design: intermodal transportation planning and vehicle routing problems. University of Louisville, 2016. 167 p.
21. Shankar Adhikari, Barbara Ozarska. Minimizing environmental impacts of timber products through the production process «From Sawmill to Final Products» // Environmental Syst Res. 2018. 7, 6. URL: <https://doi.org/10.1186/s40068-018-0109-x> (дата обращения: 03.09.2024).
22. Ozeceylan E., Kiran M.S., Atasagun Y. A New Hybrid Heuristic Approach for Solving Green Traveling Salesman Problem, Proceedings of the 41st International Conference on Computers & Industrial Engineering. October 23-26, Los Angeles-USA, 2011. P. 720-725.
23. Dave Roos. 5 Green Methods of Transporting Goods // How Stuff Works. URL: <https://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/5-green-methods-transporting-goods.htm> (дата обращения: 03.09.2024).
24. Green Supply Chain Management: What It Is and Why It Matters? // Edureka. Com. URL: <https://www.edureka.co/blog/green-supply-chain-management> (дата обращения: 16.09.2024).
25. СП 318.1325800.2017. Свод правил. Лесные дороги. Правила эксплуатации от 26.06.2017 г. // Консорциум Кодекс. Электронный фонд актуальных правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/556610333> (дата обращения: 15.09.2024).
26. СП 288.1325800.2016. Свод правил. Лесные дороги. Правила проектирования и строительства от 17.06.2017 г. // Консорциум Кодекс. Электронный фонд актуальных правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456069592> (дата обращения: 16.09.2024).
27. ГОСТ Р 59205-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Охрана окружающей среды. Технические требования. Введ. 01.07.2021 // ГОСТ Ассистент AI - платформа на основе ИИ для современной работы с нормативно-правовыми актами и гос. стандартами. URL: <https://gostassistant.ru/doc/f62e6145-7ef7-4c51-9414-3afebcb2e1b> (дата обращения: 05.09.2024).
3. Grigor'ev I.V., Tihonov I.I., Grigor'eva O.I., Rudov M.E. Search for new technical solutions to improve the environmental compatibility of forest machines with the forest environment // Intensifikaciya formirovaniya i ohrany intelektual'noj sobstvennosti: materialy respublikanskoj nauch.-prakticheskoy konf., posvyashch. 75-letiyu PetrGU. (15-16 maya 2015 g.). Petrozavodsk, 2015. P. 9-11.
4. Kruchinin I.N. The role of the transport and production system of the forest complex in the system of sustainable forest management // Symposium forest.ru. URL: http://symposium.forest.ru/article/2010/5_safety/Kruchinin.htm (дата обращения: 03.09.2024).
5. Kruchinin I.N. The impact of the forest transport system on the environment // Sostoyanie i perspektivy transporta. Obespechenie bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya: materialy mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. k 30-letiyu avtodorozhnogo fakul'teta Permskogo gos. tekhnicheskogo un-ta (16-17 apr. 2009 g.). Perm', 2009. P. 161-166.
6. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. The main directions of ensuring environmental safety of logging production // Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice. 2015. V. 3, № 2-1 (13-1). P. 202-205.
7. Abramova I.O., Murtazina M.Sh. Green transport logistics as a tool for improving the economic activity of transport companies // The Eurasian Scientific Journal. 2018. № 3. URL: <https://esj.today/> (дата обращения: 03.09.2024).
8. Shatalova E.E. Improving the assessment of mass emissions of pollutants in exhaust gases of motor transport: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.10. Volgograd, 2007. 16 p.
9. Krivoshapkina O., Yakovleva A., Zakharova A., Pavlova A., Eroshenko V., Gogoleva P., Tikhonov E., Kunickaya O. Environmental safety of residents of Yakutsk and Zhatay: evidence from sociological research // Journal of Environmental Studies and Sciences. 2022. Vol. 12, № 3. P. 566-576.
10. Kuznecov A.V., Skrypnik V.I., Vasil'ev A.S., Shegel'man I.R. The possibilities of effective implementation of technical and economic engineering tasks in planning and optimizing the work of forest transport // Engineering journal of Don. E-journal. 2017. № 2 (45). P. 62.
11. Belyakov S.L., Belyakova M.L., Bozhenyuk A.V., Savel'eva M.N. Optimization of flows in transport systems // Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. Section III. Modeling of complex systems. 2014. № 5. P. 161-167.
12. Ivannikov V.A. Improvement of the system of formation of timber cargo flows on related types of transport: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. Voronezh, 2019. 36 p.
13. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. Increase of ecological efficiency of silvicultural production // Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice. 2014. V. 2, № 3-4 (8-4). P. 51-55.
14. Storozhenko S.S. Improving the efficiency of the transport and technological process of forest-industrial enterprises on the basis of logistic and mathematical models: dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2003. 210 p.
15. Lavrikov I.N., Syshchikov D.A., Tarabrin D.A. Problems of the organization of multimodal transport in Russia // Nauka cherez prizmu vremeni. 2018. № 2 (11). P. 43-46.
16. Kostrov V.N. Logistics of mixed transportation: monogr. N. Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2020. 124 p.
17. Krivosheev A.Yu. Logistic problems of the development of multimodal transport // Proceedings of St. Petersburg State University of Economics. 2015. № 3 (93). P. 130-134.
18. Griбанov I.Yu. Environmental impact assessment during the construction and operation of a logging road in the Primorsky Territory [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vozdeystviya-na-okruzhayuschuyu-sredu-pri-stroitelstve-i-ekspluatatsii>

References

1. A set of tools for "green" logistics // Mezhdunar. dostavka DHL Express. URL: <https://express.dhl.ru/business/export-online-stores/sovety-v-oblasti-elektronnoy-torgovli/nabor-instrumentov-dlya-zelenoy-logistiki/> (дата обращения: 03.09.2024).
2. What is the impact of transport on the environment? // Zelenaya himiya. PCC Greenline blog. URL: <https://www.products.pcc.eu/ru/> (дата обращения: 03.09.2024).

- lesovoznoy-dorogi-v-primorskoy-krae/viewer (data obrashcheniya: 05.09.2024).
19. Enaleeva-Bandura I.M., Kovalev R.N., Baranov A.N., Shishorkin N.N. Models and methods of ecological and economic assessment of productivity of forest territories taking into account the level of development of the transport network: monogr. Krasnoyarsk, 2022 162 p.
 20. Duan X. Green logistic network design: intermodal transportation planning and vehicle routing problems. University of Louisville, 2016. 167 p.
 21. Shankar Adhikari, Barbara Ozarska. Minimizing environmental impacts of timber products through the production process «From Sawmill to Final Products» // Environmental Syst Res. 2018. 7, 6. URL: <https://doi.org/10.1186/s40068-018-0109-x> (data obrashcheniya: 03.09.2024).
 22. Ozceylan E., Kiran M.S., Atasagun Y. A New Hybrid Heuristic Approach for Solving Green Traveling Salesman Problem, Proceedings of the 41st International Conference on Computers & Industrial Engineering. October 23-26, Los Angeles-USA, 2011. P. 720-725.
 23. Dave Roos. 5 Green Methods of Transporting Goods // How Stuff Works. URL: <https://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/5-green-methods-transporting-goods.htm> (data obrashcheniya: 03.09.2024).
 24. Green Supply Chain Management: What It Is and Why It Matters? // Edureka. Com. URL: <https://www.edureka.co/blog/green-supply-chain-management> (data obrashcheniya: 16.09.2024).
 25. SP 318.1325800.2017. Set of rules. Forest roads. Rules of operation dated 06/26/17 // Konsorcium Kodeks. Elektronnyj fond aktual'nyh pravovyh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/556610333> (data obrashcheniya: 15.09.2024).
 26. SP 288.1325800.2016. Code of rules. Forest roads. Rules of design and construction dated 06/17/17 // Konsorcium Kodeks. Elektronnyj fond aktual'nyh pravovyh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456069592> (data obrashcheniya: 16.09.2024).
 27. GOST R 59205-2021. Public roads. Environmental protection. Technical requirements dated 07/01/2021 // GOST Assistant AI - platforma na osnove II dlya sovremennoj raboty s normativno-pravovymi aktami i gos. standartami. URL: <https://gostassistant.ru/doc/f62e6145-7ef7-4c51-9414-3afebcb2e1b> (data obrashcheniya: 05.09.2024).