

УДК 625.711.84: 65.012.23

DOI:10.18324/2077-5415-2024-1-101-108

Методологические основы планирования лесотранспортной сети с учетом вида лесов

Р.Н. Ковалев^{1a}, И.М. Еналеева-Бандура^{2b}, А.Н. Баранов^{2c}, О.А. Куницкая^{3d},
С.А. Бровкин^{2e}, С.И. Ревяко^{4f}

¹ Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия

² Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, пр. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, Россия

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

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

^a kir9624@yandex.ru, ^b melnikov1978@inbox.ru, ^c aleksandr-baranov-55@mail.ru, ^d ola.ola07@mail.ru,

^e worb1@mail.ru, ^f revyako77@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-8928-8765>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-1333-6285>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, ^e <https://orcid.org/0000-0001-6745-4523>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>

Статья поступила 02.02.2024, принята 16.02.2024

Статья посвящена актуализации роли транспортной сети на территории лесного фонда в аспекте повышения эффективности использования лесов и достижения целей устойчивого управления лесами и лесопользования. Также обозначена взаимозависимость эффективности многоцелевого лесопользования и параметров лесотранспортной сети, выявлены слабая изученность проблемы и практическая необходимость рационального планирования сети лесных дорог в различных категориях лесов, а также отсутствие в современной научной литературе комплексного системного подхода к оцениванию эффективности планирования лесотранспортной сети по критерию максимума реализации общего лесного ресурсного потенциала. Установлено отсутствие научной методологии планирования сети лесных дорог в резервных и защитных лесах. В этой связи авторами исследования определены основные параметры лесотранспортных сетей в зависимости от вида лесов; обоснован способ получения оптимальных параметров сети лесных дорог на основе учета многоцелевого характера лесопользования при оценке величины ресурсного потенциала лесных земель в зависимости от категории лесов; установлено, что оценка эффективности планирования лесотранспортной сети должна быть комплексной, базироваться на системном подходе и реализовываться посредством, в том числе, методов математического моделирования. Предложенная авторами модель основана на использовании методов финансовой математики, комбинаторики и математической статистики, системного подхода и экономико-математического моделирования, линейного и динамического программирования. Методологическая разработка представлена подробным описанием всех входящих в нее зависимостей, отмечены преимущества ее применения.

Ключевые слова: лесной ресурсный потенциал; земли лесного фонда; виды лесов; лесотранспортная сеть; математическая модель.

Methodological basis for planning a forest transport network taking into account the type of forests

R.N. Kovalev^{1a}, I.M. Enaleeva-Bandura^{2b}, A.N. Baranov^{2c}, O.A. Kunitskaya^{3d},
S.A. Brovkin^{2e}, S.I. Revyako^{4f}

¹ Ural State Forestry Engineering University; 37, Siberian Tract St., Ekaterinburg, Russia

² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, Russia

³ Arctic State Agrotechnological University; 3 km, Sergelyakhskoe Shosse, Bld. 3, Yakutsk, Republic of Sakha

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

^a kir9624@yandex.ru, ^b melnikov1978@inbox.ru, ^c aleksandr-baranov-55@mail.ru, ^d ola.ola07@mail.ru,

^e worb1@mail.ru, ^f revyako77@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-8928-8765>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>, ^c <https://orcid.org/0000-0003-1333-6285>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, ^e <https://orcid.org/0000-0001-6745-4523>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-7362-5042>

Received 02.02.2024, accepted 16.02.2024

This article is devoted to the actualization of the role of the transport network in the territory of the forest fund in terms of increasing the efficiency of forest use and achieving the goals of sustainable forest management and forest management. The interdependence of the effectiveness of multi-purpose forest management and the parameters of the forest transport network is also indicated, the weak study of the problem and the practical need for rational planning of the forest road network in various categories of forests are manifested, the absence in modern scientific literature of a comprehensive systematic approach to evaluating the effectiveness of planning a forest transport network according to the criterion of the maximum realization of the total forest resource potential is revealed. The absence of a scientific methodology for planning a network of forest roads in reserve and protective forests is established. In this regard, the main parameters of forest transportation networks depending on the type of forests are identified; a method is substantiated for obtaining optimal parameters of a forest road network based on the multi-purpose nature of forest management when assessing the value of the resource potential of forest lands depending on the category of forests. It is established that the assessment of the effectiveness of forest transport network planning should be comprehensive, based on a systems approach and implemented through, among other things, mathematical modeling methods. The model proposed is based on the use of methods of financial mathematics, combinatorics and mathematical statistics, system approach and economic and mathematical modeling, linear and dynamic programming. The methodological development is presented with a detailed description of all the dependencies included, and the advantages of its application are noted.

Keywords: forest resource potential; forest fund lands; types of forests; forest transport network; mathematical model.

Введение. На сегодняшний день реализация принципов устойчивого управления лесами при многоцелевом лесопользовании, закрепленных в Лесном кодексе РФ [4], находится в тесном сопряжении с развитием транспортной инфраструктуры лесных территорий.

В работах [1–3; 6] научно обосновано, что практическое освоение и вовлечение в хозяйственный оборот всего ресурсного потенциала лесных земель с позиций как технико-экономической оценки эффективности управления лесами региона, так с социальной и экологической стороны оценивания данного потенциала не представляется возможным без достаточного уровня развития сети лесных дорог. Таким образом, обозначается прямая зависимость эффективности использования всего ресурсного потенциала лесных территорий и эффективности планирования параметров сети лесных дорог. В свою очередь, показатель эффективности указанного планирования, с учетом современных принципов устойчивого управления лесами и лесопользованием, должен базироваться не только на аспектах главного лесопользования, но и учитывать многоцелевой характер использования лесных благ, т. е. иметь комплексный (основанный на принципах системности и единстве учета технико-экономических, социальных и экологических свойств извлекаемых лесных ресурсов) критерий оценивания по показателю эффекта от реализации государственного проекта.

Но, несмотря на множественность исследований в данной научной области [5; 7–14], выполненных как отечественными, так и зарубежными учеными, вопрос рациональности планирования сети лесных дорог остается открытым, поскольку в указанных исследованиях отсутствует комплексный подход на основе принципов системности к оцениванию эффективности данного планирования. СССР в период плановой экономики был крупной лесной державой и делил 1-2-е места в мире по объему заготовок древесины, и все ресурсы, в том числе научные, были сосредоточены в основном в этом направлении, при планировании транспортных сетей превалировал технико-экономический подход. Да другого и быть не могло, поскольку научная мысль пришла лишь позднее к тому факту, что экологические и социальные полезности леса стоят значительно дороже его сырьевых функций. Предприятия и организации лесной промышленности и лесного хозяйства тогда были разде-

лены организационно, и каждое из них выполняло свои задачи независимо друг от друга, хотя в научной среде велись дискуссии об их объединении. Но лесохозяйственная наука достаточно глубоко разрабатывала и разрабатывает лесохозяйственные регламенты и для защитных и резервных лесов (по новой терминологии; в СССР это были леса I группы), но без дорожной составляющей. К сожалению, в основном и в настоящее время эффективность сети лесных дорог принято рассматривать с позиции главного пользования, осуществляемого в эксплуатационных лесах (до 2007 г. это леса II и III группы). Очевидно, что и в резервных и защитных лесах тоже должна осуществляться многоплановая и интенсивная хозяйственная деятельность согласно видам разрешенного в них лесопользования, а также должны реализовываться мероприятия по лесовосстановлению, охране и защите лесов. Таким образом, подход к планированию сети лесных дорог только с позиции главного лесопользования обуславливается упущением как многоплановости и многогранности значения лесов, так и многоцелевого характера использования их ресурсов, а также учета практической реализации лесохозяйственной деятельности на территориях не только эксплуатационных, но также резервных и защитных лесов [1; 15–23].

Таким образом, обозначается практическая потребность в выработке методологии планирования сети лесных дорог в резервных и защитных лесах.

Учитывая вышеизложенное, становится очевидным, что разработка надежного и универсального методологического аппарата планирования и оценки комплексной эффективности лесотранспортной сети в различных видах лесов является актуальным научным направлением.

Цель работы. Сделана попытка обоснования комплексной интегральной оценки эффективности планирования сети лесных дорог.

Материалы и методы исследования. В настоящее время в соответствии с Лесным кодексом РФ все леса, расположенные на землях лесного фонда России, разделены на три вида — защитные, эксплуатационные и резервные. Также согласно Лесному кодексу РФ для каждого вида лесов имеется установленный режим реализации лесопользования и ведения лесного хозяйства [4]. Очевидно, что эти виды лесов имеют между собой кардинальные отличия по своему целевому назначе-

нию. Если целевым назначением эксплуатационных лесов является первоочередное обеспечение в надлежащем объеме экономики страны лесными материальными ресурсами, то защитные леса должны надлежащим образом выполнять экологические функции, значение которых в настоящее время возросло многократно.

Планируется, что резервные леса более 20 лет находятся в резерве, и здесь основная их цель — сохранение, в первую очередь от пожаров и других отрицательных воздействий. Также очевидно, что в связи с этим лесотранспортные сети, в зависимости от вида обслуживаемых лесов, как по общим параметрам пространственной конфигурации, так и по элементным составляющим, должны кардинально отличаться, чтобы быть эффективными в народно-хозяйственном аспекте в целом.

Отмеченное обстоятельство подтверждают действующие нормативные документы [24; 25]. Согласно данной нормативно-правовой базе, лесотранспортные сети в резервных и защитных лесах характеризуются отсутствием лесовозных дорог ввиду того что в данных видах лесов не подлежит реализации главное лесопользование.

В этой связи лесотранспортные сети в рассматриваемых видах лесов включают в себя только лесохозяйственные дороги, в состав которых также входят и дороги противопожарного назначения.

Соответственно, опираясь на вышеотмеченное, несложно сделать вывод о том, что основными отличиями лесотранспортных сетей в резервных и защитных лесах от сетей лесных дорог в лесах эксплуатационных являются интенсивность движения транспортных средств и, соответственно, грузооборот данных дорог.

Несмотря на то, что указанные технологические показатели лесовозных дорог значительно превышают показатели дорог лесохозяйственных, значение последних в аспекте эффективности реализации хозяйственной деятельности на территории лесного фонда достаточно высоко, поскольку именно наличие лесохозяйственных дорог позволяет качественно реализовать как лесовосстановительные мероприятия, так и мероприятия по охране и защите лесов (рис. 1).



Рис. 1. Взаимосвязь уровня развития лесотранспортной сети в различных видах лесов и эффективности реали-

зации хозяйственной деятельности на территории лесного фонда

Исходя из анализа теоретического материала, представленного на рис. 1, несложно заключить, что роль дорог лесохозяйственного назначения в аспекте устойчивого управления лесами и лесопользованием достаточно значима.

Учитывая вышеуказанные обстоятельства, можно утверждать, что рациональное планирование сетей лесных дорог в резервных и защитных лесах является не менее значимой задачей, чем данное планирование в лесах эксплуатационных. Анализ состояния вопроса по отмеченной проблематике показал, что, в отличие от эксплуатационных лесов, каких-либо выдвинутых теоретических положений и методов планирования лесотранспортных сетей в защитных и резервных лесах практических не существует ни в отечественных, ни в зарубежных источниках [5; 26–30].

В 1976 г. в СССР была издана единственная по этой проблеме книга проф. Б.И. Кувалдина «Лесохозяйственные дороги», где методы их оптимизации целиком основаны на технико-экономическом подходе [31]. По нашему мнению, данный подход к планированию сетей лесных дорог является недостаточно верным в условиях устойчивого управления лесами. В целях данной научной статьи поясним выведенное нами утверждение. Общеизвестно, что лесотранспортная сеть представляет собой средство достижения ресурсов лесных территорий.

В свою очередь, сеть лесных дорог является достаточно капиталоемким объектом и требует в рамках своего создания и развития значительных финансовых вложений. Очевидно, что данные вложения должны окупиться посредством реализации извлеченных с лесных территорий ресурсов.

Таким образом, окупаемость лесотранспортной сети в эксплуатационных лесах осуществляется посредством следующих мер:

- реализации главного лесопользования; реализации разрешенного лесопользования, в том числе заготовка и сбор не древесных ресурсов леса, охота, рыбалка и др. Данный аспект хозяйственной деятельности на территориях лесного фонда можно рассматривать как технико-экономическую составляющую показателя окупаемости лесотранспортной сети;

- использования средо- и почвозащитных функций леса. Также в аспекте технико-экологической составляющей показателя окупаемости следует указать и реализацию положенных в соответствии с лесохозяйственными регламентами лесовосстановительных и противопожарных мероприятий. Соответственно, в данном контексте окупаемость сети лесных дорог будет реализована за счет сохранения лесов от пожаров и вредителей, а также за счет выращивания высокопродуктивной и высококачественной древесины на подлежащих восстановлению лесных территориях. Т. е. в данном контексте в показатель окупаемости включаются доходы будущих периодов (данное обстоятельство является основополагающим в рамках необходимости научно обоснованного планирования лесохозяй-

ственных дорог и капитальных вложений в их создание и развитие);

– реализации рекреации, научно-исследовательской и религиозной деятельности и др. Данный аспект хозяйственной деятельности на территориях лесного фонда следует определять как социальную составляющую показателя окупаемости лесотранспортной сети.

Окупаемость лесотранспортной сети в резервных и защитных лесах, в основном, включает в себя те же показатели, что и в лесах эксплуатационных. Соответственно, без учета главного лесопользования, так как оно запрещено в резервных и защитных лесах, также будут варьироваться показатели по разрешенному лесопользованию в зависимости от категорий лесов, согласно Лесному кодексу РФ [4].

Учитывая как вышеизложенное, так и результаты исследований [1–3; 6], можно утверждать, что планирование лесотранспортных сетей в различных видах лесов должно осуществляться не только на базе технических и экономических критериев, определяющих параметры пространственной конфигурации сети лесных дорог и входящих в нее элементов, но также учитывать экологические и социальные аспекты данного планирования.

Таким образом, определяется необходимость оценивания эффективности планирования сетей лесных дорог в различных видах лесов на основе комплексного критерия, включающего в себя как технико-экономическую оценку указанного планирования, так и экологическую и социальную составляющие данной оценки. В этой связи нами выработан комплексный подход к оцениванию эффективности планирования лесотранспортной сети: базирующийся на принципах системности; учитывающий влияние всех факторов внешней среды в динамике; многосторонний характер планируемых к извлечению и реализации ресурсов лесных земель (рис. 2).



Рис. 2. Комплексный подход к оцениванию эффективности планирования лесотранспортных сетей в различных видах лесов

Следует отметить, что подобный подход к данной оценке практически отсутствует в научной литературе. Данное обстоятельство послужило основанием даль-

нейших исследований в области рассматриваемой проблематики, посредством которых была установлена необходимость выработки методологии планирования лесотранспортной сети в различных видах лесов на основе разработанного подхода. Подобная методология по своей сути должна являться научным обоснованием указанного планирования. Данная методология и метод ее реализации должны обладать универсальностью, позволяющей его применение при планировании лесотранспортных сетей в различных видах лесов и включать в себя оценку как дорожной, так и транспортной составляющих проекта планирования параметров сети лесных дорог. Согласно источникам [1–3; 6], реализация подобного способа оценки возможна посредством выработки соответствующего отмеченным критериям методологического аппарата.

Для практической реализации выдвинутых теоретических положений необходима разработка математических моделей определения комплексной эффективности планирования лесотранспортной сети с учетом вида лесов. Данная модель является укрупненной в связи с тем, что подробное рассмотрение некоторых входящих в нее зависимостей представлено в источниках [1–3; 6].

В качестве математической модели можно вывести следующую зависимость в аспекте определения комплексной эффективности планирования лесотранспортной сети в различных видах лесов в рамках ее дорожной составляющей:

$$\mathcal{E}_{\text{лдор}} = \begin{cases} \mathcal{E}\Phi_{\text{п}} = \frac{(\Pi^{\text{сн}} + \Pi^{\text{эк}})^2 \cdot (t+1)^2}{\Pi_3^2 \cdot t^2} \times 100\% \\ \mathcal{E}^{\text{л}} = \frac{(\Pi^{\text{сн}} + \Pi^{\text{эк}})^2 \cdot (t+1)^2}{(\sum_l^t \mathcal{Z}_{\text{лв}} + \sum_d^D \mathcal{Z}_{\text{лв}})^2 \cdot t^2} \times 100\% \\ \mathcal{E}\Phi_{\text{п}}^{\text{пр}} = \frac{U_{\text{сум}}^{\text{пред}^2} \cdot (t+1)^2}{\Pi_3^2 \cdot t^2} \times 100\% \end{cases}, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}\Phi_{\text{п}}$ — показатель эффекта от реализации ресурсов лесных территорий в зависимости от вида лесов с учетом параметров сети лесных дорог в период времени от t до $(t + 1)$, $p./p.$; $\mathcal{E}^{\text{л}}$ — показатель эффекта от осуществления мероприятий, связанных с лесовосстановлением с учетом параметров сети лесных дорог в период времени от t до $(t + 1)$ по видам лесов, $p./p.$; $\mathcal{E}\Phi_{\text{п}}^{\text{пр}}$ — показатель эффекта от осуществления противопожарных мероприятий с учетом параметров сети лесных дорог в период времени от t до $(t + 1)$ по видам лесов, $p./p.$; $\mathcal{Z}_{\text{лв}}$ — совокупные затраты, связанные с лесовосстановлением l -й породы, $l \in [0, \dots, L]$, (d -го ресурса) $d \in [0, \dots, D]$, в период времени от t до $(t + 1)$ $p./za$; Π_3 — совокупные издержки, связанные со строительством, реконструкцией и ремонтом лесных дорог, с учетом вида лесов, в период времени от t до $(t + 1)$, $p./za$; $U_{\text{сум}}^{\text{пред}}$ — величина сохраненного ресурсного потенциала лесных земель от пожаров посредством своевременного проведения лесохозяйственных мероприятий по охране и защите лесов, в интервал времени $(t + 1)$, $p./za$. Данный показатель определяется согласно методологическому аппарату, представленному в [2].

Выражение $\Pi^{\text{сн}} + \Pi^{\text{эк}}$ является совокупной величиной валовой прибыли от реализации всех видов лесопользования в интервал времени $(t + 1)$, $p./za$, в котором показатель $\Pi^{\text{сн}}$ является прибылью от реализации

древесного сырья (в основном эксплуатационных лесов). Относительно показателя $\Pi^{ЭК}$ можно отметить, что отмеченный показатель является интегральной величиной, включающей в себя как прибыль от экологических полезностей леса, так и прибыль от разрешенного (побочного) лесопользования в зависимости от видов лесов, а также использование ресурсов лесных территорий в социальном аспекте (туризм, охота, рыбалка, сбор лекарственных трав, ягод и т. п.; научно-исследовательская деятельность и т. д.) согласно [4].

В рамках транспортной составляющей указанного планирования на основе системного подхода определяется нижеследующая зависимость в аспекте определения комплексной эффективности планирования лесотранспортной сети в различных видах лесов:

$$\mathcal{E}_l^{кТР} = \begin{cases} \mathcal{E}\Phi^{ТР} = \frac{\Pi_c^{сум^2} \cdot (t+1)^2}{C_{МС}^{сум^2} \cdot t^2} \times 100\% \\ \mathcal{E}\Phi_l^{ТР} = \frac{\Pi_l^{сум^2} \cdot (t+1)^2}{C_l^{сум^2} \cdot t^2} \times 100\% \\ \mathcal{E}\Phi^{ПТ} = \lim_{t_\phi \rightarrow 0} \frac{t_\phi(t)}{t_n(t)} \times 100\% \\ \mathcal{E}\Phi_c^{ТР} = \frac{R_d^p(t+1)}{R_d^c(t)} \times 100\% \end{cases}, \quad (2)$$

где $\mathcal{E}\Phi^{ТР}$ — показатель эффекта от применения подвижного состава на вывозке древесины с учетом параметров сети лесных дорог. Следует отметить, что указанный показатель в основном является составляющей комплексного эффекта от планирования сети лесных дорог в эксплуатационных лесах, но может быть включен и в комплексный эффект от планирования лесотранспортной сети в резервных и защитных лесах в рамках реализации санитарных рубок или рубок, связанных с созданием и развитием сети лесных дорог, в период времени от t до $(t + 1)$, $p./p.$; $\mathcal{E}\Phi_l^{ТР}$ — показатель эффекта от применения подвижного состава на вывозке лесных ресурсов, полученных в результате реализации разрешенного лесопользования; также в данный показатель включается эффект от использования транспортных средств при доставке лесохозяйственных грузов по видам лесов с учетом параметров сети лесных дорог в период времени от t до $(t + 1)$, $p./p.$; $\mathcal{E}\Phi^{ПТ}$ — показатель эффекта от использования специальной техники в аспекте доставки сил пожаротушения к очагам горения в период пожароопасного сезона с учетом параметров сети лесных дорог в интервал времени от t до $(t + 1)$, $p./p.$; $\mathcal{E}\Phi_c^{ТР}$ — показатель эффективности транспортной связи населенных пунктов, в аспекте обмена грузами между данными пунктами, с учетом параметров сети лесных дорог в интервал времени от t до $(t + 1)$, $p./p.$; $\Pi_c^{сум}$ — величина совокупной производительности подвижного состава на вывозке древесины за машино-смену в интервал времени $(t + 1)$, $p.$ Очевидно, что в данном контексте рассматриваемый показатель определяется в стоимостном выражении. Методика определения указанной величины в натуральном выражении изложена в [6]; $C_{МС}^{сум}$ — общая стоимость машино-смены на вывозке древесины в период времени от t до $(t + 1)$, $p.$; $\Pi_c^{сум}$ — величина совокупной производительности подвижного состава

на вывозке ресурсов в аспекте разрешенного лесопользования и доставке грузов лесохозяйственного назначения за машино-смену по видам лесов в период времени $(t + 1)$, $p.$; $C_{МС}^{сум}$ — общая стоимость машино-смены на вывозке ресурсов в аспекте разрешенного лесопользования и доставке грузов лесохозяйственного назначения по видам лесов, в период времени от t до $(t + 1)$, $p.$; t — базовый временной интервал периода оценивания комплексной эффективности планирования лесотранспортной сети; $(t + 1)$ — отчетный временной интервал периода оценивания комплексной эффективности планирования лесотранспортной сети; t_ϕ — фактическое время доставки спецтехники и пожарных бригад к очагу возгорания в период времени от t до $(t + 1)$, ч. Данный показатель определяется как отношение нормативного времени к расчетному времени доставки рабочих и специальной техники к очагу возгорания по отдельным элементам лесотранспортной сети по видам лесов (включая расстояние по пересеченной местности) с учетом факторов снижения среднетехнических скоростей подвижного состава, обусловленных естественными причинами [33–35]. Отмеченные расчеты представлены в [3]; t_n — временной интервал доставки рабочих и специальной техники, указанный в нормативах [5], для лесочастков первой категории природной горимости 1 ч, для второй — 2 ч, для третьей, четвертой и пятой категорий горимости лесов — 3 ч; R_d^c — расстояние доставки грузов между населенными пунктами в период времени t , км; R_d^p — расстояние доставки грузов между населенными пунктами с учетом параметров сети лесных дорог в период времени $(t + 1)$, км.

Учитывая, что комплексный эффект от планирования сети лесных дорог в различных видах лесов является интегральным показателем, включающим в себя транспортную и дорожную составляющие ее планирования, то существует практическая необходимость объединения систем, представленных выражениями (1), (2) в единый методологический аппарат. Данное объединение выполнено посредством использования формулы определения средней геометрической величины, в которую нами введен предел роста комплексной эффективности по показателю рентабельности планирования лесотранспортной сети по видам лесов ввиду естественной невозможности функции, определяющей общий эффект, быть направленной на бесконечное возрастание итогового показателя.

Таким образом, интеграция выражений (1), (2) имеет следующий вид:

$$\mathcal{E}_l^{кОбщ} = \lim_{R \rightarrow 1} \sqrt[7]{\mathcal{E}\Phi_{П} \cdot \mathcal{E}_l \cdot \mathcal{E}\Phi_{П}^{ПТ} \cdot \mathcal{E}\Phi^{ТР} \cdot \mathcal{E}\Phi_l^{ТР} \cdot \mathcal{E}\Phi^{ПТ} \cdot \mathcal{E}\Phi_{соц}^{ТР}}. \quad (3)$$

Разработанный авторами методологический аппарат реализуется с учетом нижеприведенных ограничений:

1. Возмещение затрат, связанных с планированием сетей лесных дорог в резервных, защитных и эксплуатационных лесах:

$$\frac{P^{сп} + P^{ЭК}}{(1+e)^t} \cdot \left(1 + \frac{1}{(1+e)^{(t+1)}}\right) > P_3, \quad (4)$$

где e — коэффициент дисконтирования. Ввод данного показателя в модель обусловлен возможностью изменения ценовых параметров технологических процессов в период времени от t до $(t + 1)$.

2. Платежеспособность предприятия, реализующего проект планирования сетей лесных дорог в резервных, защитных и эксплуатационных лесах:

$$\frac{P_3}{(1+e)^t} \cdot \left(1 + \frac{1}{(1+e)^{(t+1)}}\right) \leq P_{пл}, \quad (5)$$

где $P_{пл}$ — величина максимально возможных финансовых вложений в проект планирования сетей лесных дорог в резервных, защитных и эксплуатационных лесах в период времени от t до $(t + 1)$, p .

3. Возмещение затрат, связанных с лесовозобновлением, а также с охраной и защитой лесов:

$$\frac{\sum_l^t Z_{лв} + \sum_d^D Z_{лв}}{(1+e)^t} \cdot \left(1 + \frac{1}{(1+e)^{(t+1)}}\right) \leq P^{сп} + P^{ЭК}. \quad (6)$$

4. Эффективное плечо доставки рабочих бригад, спецтехники, дорожно-строительных материалов до i -го лесного участка от j -го пункта отправления не должно превышать доступное с экономической точки зрения расстояние доставки [32].

5. Фактическая оценка предотвращенного эколого-экономического ущерба:

$$U_{сум}^{пред} \leq C_{общ}^{сохр}, \quad (8)$$

где $C_{общ}^{сохр}$ — суммарная экономическая оценка ресурсов лесных земель, в период времени t , $p/га$.

Ограничение, приведенное в выражении (8), позволит избежать превышения суммарной экономической оценки спасенных ресурсов лесных земель над их фактической величиной в период времени $(t + 1)$.

Литература

1. Ковалев Р.Н., Еналеева-Бандура И.М., Баранов А.Н., Лозовой В.А., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Метод оценки эффективности лесовосстановительных мероприятий с учетом параметров лесотранспортной сети // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 4 (56). С. 64-71.
2. Ковалев Р.Н., Еналеева-Бандура И.М., Баранов А.Н., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Математическая модель определения общей стоимости ресурсов лесных земель с учётом уровня развития лесотранспортной сети // Resources and Technology. 2022. V. 19, № 4. P. 102-117.
3. Ковалев Р.Н., Еналеева-Бандура И.М., Баранов А.Н., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Математическая модель определения эффективности доставки сил и средств пожаротушения с учетом уровня развития транспортной сети на территории лесного фонда // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 4 (52). С. 57-62.
4. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 30.12.2021) с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022 // Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/ (дата обращения: 14.12.2022).
5. Методические рекомендации по применению сил и средств для тушения лесных пожаров: утв. МЧС России 16.07.2014 № 2-4-87-9-18 // Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс». URL:

Также к ограничениям реализации разработанного методологического аппарата можно отнести ограничения, прописанные в [1–3].

Достоинствами предлагаемой методологической разработки являются гибкость и адаптивность, что в сочетании дает возможность ее применения в различных условиях природно-производственной среды.

Выводы. Выработанная методология планирования лесотранспортной сети в различных видах лесов на основе системного подхода обеспечит следующее:

- реализацию учета всех материальных и нематериальных выгод от лесопользования в динамике;
- определение качества производства лесохозяйственных мероприятий и наиболее рациональной технологической схемы использования подвижного состава на вывозке как ресурсов главного пользования лесами, так и ресурсов разрешенного (побочного) лесопользования;
- определение оптимального уровня развития лесохозяйственных дорог, в том числе дорог противопожарного назначения, что становится особенно актуальным в условиях происходящих изменений климата;
- качественную оценку уровня развития транспортных связей между населенными пунктами на землях лесного фонда.

Перечисленные возможности представленной в статье методологической разработки, реализуемые на основе их интеграции в единый инструмент планирования, позволяют определить период окупаемости затрат, связанных с созданием и развитием сети лесных дорог с учетом поэлементной пространственной конфигурации сети в зависимости от вида лесов, на территории которых планируется ее развитие.

Часть материалов исследования получена за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092/, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

- https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_246655/ (дата обращения: 14.12.2022).
6. Еналеева-Бандура И.М. Методологические основы планирования лесотранспортной сети в условиях многоцелевого лесопользования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Красноярск, 2022. 40 с.
 7. Rego G.E., Voronov R.V., Grigoreva O.I. Algorithms for calculating schemes of transport routes in a felling area // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2. Ser. II All-Russian Scientific-Technical Conference Digital Technologies in Forest Sector, 2021. P. 012025.
 8. Рего Г.Э., Воронов Р.В., Григорьев И.В. Алгоритм локального поиска для задачи покрытия полигона лесом корневых деревьев // Инженерный вестн. Дона. 2022. № 10 (94). С. 240-259.
 9. Злобина Н.И., Зеликов В.А., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю. Определение пропускной способности лесовозных автомобильных дорог эмпирическим путем с учетом безопасности дорожного движения // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 5. С. 38-65.
 10. Злобина Н.И., Зеликов В.А., Григорьева О.И., Новгородов Д.В. Экспериментальное обоснование выбора скорости движения по лесовозной дороге в качестве показателя безопасности дорожного движения // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 6. С. 27-42.

11. Злобина Н.И., Зеликов В.А., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю. Обзор безопасности дорожного движения на лесовозных автомобильных дорогах // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 4. С. 4-18.
12. Злобина Н.И., Зеликов В.А., Зорин М.В., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю. Обоснование экономической эффективности безопасности дорожного движения на лесовозных автомобильных дорогах // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 1. С. 44-51.
13. Григорьев И.В., Жукова А.И. Координатно-объемная методика трассирования при освоении лесосек трелевкой // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2004. № 4. С. 39-44.
14. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Pilnik Y.N., Teppoev A.V., Lavrov M., Timokhova O.M. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. V. 25, № 3. P. 678-694.
15. Григорьева О.И., Григорьев И.В. Дикорастущие пищевые и ядовитые растения в лесах Российской Федерации // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 3. С. 10-27.
16. Григорьева О.И., Давтян А.Б. Целевое лесовыращивание как основной путь повышения эффективности лесного комплекса России // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Седьмой Всерос. нац. науч.-практической конф. с междунар. участием (25 мая 2021 г.). Петрозаводск, 2021. С. 32-33.
17. Давтян А.Б., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Энергетические лесные плантации для эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения в РФ // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 86-й науч.-технической конф. проф.-препод. состава, науч. сотрудников и аспирантов (31 янв.-12 февр. 2022 г.). Минск, 2022. С. 42-45.
18. Абузов А.В., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Анализ потенциала лиственных лесов, произрастающих на территории Дальневосточного федерального округа // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 2 (54). С. 64-71.
19. Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Alyabyev A., Hertz E., Voronova A., Shadrina S., Grigorev I. Influence of different forest management techniques on the quality of wood // Journal of Renewable Materials. 2021. V. 9, № 12. P. 2175-2188.
20. Давтян А.Б., Григорьева О.И., Николаева Ф.В., Нгуен Т.Н. Мобильные технологии для мониторинга и управления процессами выращивания и эксплуатации лесных плантаций // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: сб. материалов Всерос. науч.-практической конф. (4-5 июня 2020 г.). Красноярск, 2020. С. 132-135.
21. Рудов С.Е., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Григорьев М.Ф., Григорьева А.И. Эффективность лесопользования в криолитозоне // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы междунар. науч.-практической конф. (9-10 июня 2020 г.). Воронеж, 2020. С. 460-463.
22. Григорьева О.И. Эффективность транспортно-технологических систем для лесного хозяйства // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-технической конф. (19 апр. 2018 г.). Тюмень, 2018. С. 79-83.
23. Григорьева О.И., Давтян А.Б. Иностраный опыт агролесоводства для повышения эффективности лесопользования // Наука и инновации: векторы развития: материалы Междунар. науч.-практической конф. молодых ученых (24-25 окт. 2018 г.). Барнаул, 2018. С. 82-85.
24. СП 318.1325800.2017. Свод правил. Лесные дороги. Правила эксплуатации от 26.06.17 г. // Доступ из справ.-правовой системы «Консорциум Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/556610333> (дата обращения: 07.02.2024).
25. СП 288.1325800.2016. Свод правил. Лесные дороги. Правила проектирования и строительства от 17.06.17 г. // Доступ из справ.-правовой системы «Консорциум Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/456069592> (дата обращения: 07.02.2024).
26. Bouchard M., Pothier D. Long-Term Influence of Fire and Harvesting on Boreal Forest Age Structure and Forest Composition in Eastern Québec // Forest Ecology and Management. 2011. V. 261, iss. 4. P. 811-820.
27. Carrasco L.R., Nghiem T.P.L., Sunderland T., Koh L.P. Economic Valuation of Ecosystem Services Fails to Capture Biodiversity Value of Tropical Forests. Biological Conservation. 2014. V. 178. P. 163-170.
28. Conard S.G., Sukhinin A.I., Stocks B.J., Cahoon D.R., Davidenko E.P., Ivanova G.A. Determining Effects of Area Burned and Fire Severity on Carbon Cycling and Emissions in Siberia // Climatic Change. 2002. V. 55, iss. 1-2. P. 197-211.
29. Hansen A.J., Spies T.A., Swanson F.J., Ohmann J.L. Conserving Biodiversity in Managed Forests: Lessons from Natural Forests // BioScience. 1991. V. 41, iss. 6. P. 382-392.
30. Schaich H., Milad M. Forest Biodiversity in a Changing Climate: Which Logic for Conservation Strategies? // Biodiversity and Conservation. 2013. V. 22, iss. 5. P. 1107-1114.
31. Кувалдин Б.И. Лесохозяйственные дороги (устройство и содержание). М.: Лесная пром-сть, 1976. 95 с.
32. Зорин М.В., Григорьев И.В. История и перспективы развития сборно-разборных покрытий для лесных дорог и технологических коридоров // Вестн. АГАТУ. 2022. № 3 (7). С. 121-138.
33. Гринько О.И., Должиков И.С., Григорьева О.И. Лесопожарные комплексы на базе мини-тракторов // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: материалы Всерос. науч.-практической конф. (24-28 апр. 2023 г.). Казань, 2023. С. 101-105.
34. Лоренц А.С., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Рябухин П.Б. Исследование применения иглофильтров в составе вакуумных установок для повышения эффективности борьбы с лесными пожарами // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4 (60). С. 124-129.
35. Григорьева О.И., Лоренц А.С., Григорьев И.В. Охрана труда и техника безопасности при эксплуатации иглофильтрационной установки для тушения лесных пожаров // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 1. С. 37-43.

References

1. Kovalev R.N., Enaleeva-Bandura I.M., Baranov A.N., Lozovoj V.A., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. A method for evaluating the effectiveness of forestry measures taking into account the parameters of the forest transportation network // Systems. Methods. Technologies. 2022. № 4 (56). P. 64-71.
2. Kovalev R.N., Enaleeva-Bandura I.M., Baranov A.N., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. Mathematical model for determining the total cost of forest land resources, taking into account the level of development of the forest transportation network // Resources and Technology. 2022. V. 19, № 4. P. 102-117.
3. Kovalev R.N., Enaleeva-Bandura I.M., Baranov A.N., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. Mathematical model for determining the effectiveness of the delivery of fire extinguishing forces and means, taking into account the level of development of the transport network in the territory of the forest fund // Systems. Methods. Technologies. 2021. № 4 (52). P. 57-62.
4. Forest Code of the Russian Federation dated 04.12.2006 № 200-FZ (red. ot 30.12.2021) s izm. i dop., vstup. v silu s 01.03.2022 // Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsultant

- Plyus». URL:
https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/
 (data obrashcheniya: 14.12.2022).
5. Methodological recommendations on the use of forces and means to extinguish forest fires: utv. MCHS Rossii 16.07.2014 № 2-4-87-9-18 // Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Konsul'tant Plyus». URL:
https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_246655/
 (data obrashcheniya: 14.12.2022).
 6. Enaleeva-Bandura I.M. Methodological foundations of planning a forest transportation network in conditions of multi-purpose forest management: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.21.01. Krasnoyarsk, 2022. 40 p.
 7. Rego G.E., Voronov R.V., Grigoreva O.I. Algorithms for calculating schemes of transport routes in a felling area // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2. Ser. II All-Russian Scientific-Technical Conference Digital Technologies in Forest Sector, 2021. P. 012025.
 8. Rego G.E., Voronov R.V., Grigor'ev I.V. Algorithm of local search for the problem of covering a polygon with a forest of root trees // Engineering journal of Don. E-journal. 2022. № 10 (94). P. 240-259.
 9. Zlobina N.I., Zelikov V.A., Grigor'eva O.I., Gur'ev A.YU. Determination of the capacity of logging roads empirically, taking into account the safety of road traffic // Safety and labor protection in logging and woodworking industries. 2022. № 5. P. 38-65.
 10. Zlobina N.I., Zelikov V.A., Grigor'eva O.I., Novgorodov D.V. Experimental justification for choosing the speed of movement along a logging road as an indicator of road safety // Safety and labor protection in logging and woodworking industries. 2022. № 6. P. 27-42.
 11. Zlobina N.I., Zelikov V.A., Grigor'eva O.I., Gur'ev A.YU. Review of road safety on logging trucks // Safety and labor protection in logging and woodworking industries. 2022. № 4. P. 4-18.
 12. Zlobina N.I., Zelikov V.A., Zorin M.V., Grigor'eva O.I., Gur'ev A.YU. Substantiation of the economic efficiency of road safety on logging trucks // Safety and labor protection in logging and woodworking industries. 2023. № 1. P. 44-51.
 13. Grigor'ev I.V., Zhukova A.I. Coordinate-volumetric tracing technique in the development of logging areas by skidding // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2004. № 4. P. 39-44.
 14. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Pilnik Y.N., Teppoev A.V., Lavrov M., Timokhova O.M. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. V. 25, № 3. P. 678-694.
 15. Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. Wild food and poisonous plants in the forests of the Russian Federation // Safety and labor protection in logging and woodworking industries . 2022. № 3. P. 10-27.
 16. Grigor'eva O.I., Davtyan A.B. Targeted reforestation as the main way to increase the efficiency of the Russian forest complex // Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy Sed'moj Vseros. nac. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (25 maya 2021 g.). Petrozavodsk, 2021. P. 32-33.
 17. Davtyan A.B., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. Energy forest plantations for effective involvement in the turnover of agricultural lands in the Russian Federation // Lesnaya inzheneriya, materialovedenie i dizajn: materialy 86-j nauch.-tekhnicheskoy konf. prof.-prepod. sostava, nauch. sotrudnikov i aspirantov (31 yanv.-12 fevr. 2022 g.). Minsk, 2022. P. 42-45.
 18. Abuzov A.V., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. Analysis of the potential of larch forests growing on the territory of the Far Eastern Federal District // Systems. Methods. Technologies. 2022. № 2 (54). P. 64-71.
 19. Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Alyabyev A., Hertz E., Voronova A., Shadrina S., Grigorev I. Influence of different forest management techniques on the quality of wood // Journal of Renewable Materials. 2021. V. 9, № 12. P. 2175-2188.
 20. Davtyan A.B., Grigor'eva O.I., Nikolaeva F.V., Nguen T.N. Mobile technologies for monitoring and managing the processes of growing and operating forest plantations // Innovacii v himiko-lesnom komplekse: tendencii i perspektivy razvitiya: sb. materialov Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (4-5 iyunya 2020 g.). Krasnoyarsk, 2020. P. 132-135.
 21. Rudov S.E., Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Grigor'ev M.F., Grigor'eva A.I. Efficiency of forest management in the cryolithozone // Energoeffektivnost' i energoberezhenie v sovremenom proizvodstve i obshchestve: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (9-10 iyunya 2020 g.). Voronezh, 2020. P. 460-463.
 22. Grigor'eva O.I. Efficiency of transport and technological systems for forestry // Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (19 apr. 2018 g.). Tyumen', 2018. P. 79-83.
 23. Grigor'eva O.I., Davtyan A.B. Foreign experience of agroforestry for improving the efficiency of forest management // Nauka i innovacii: vektory razvitiya: materialy Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. molodyh uchenykh (24-25 okt. 2018 g.). Barnaul, 2018. P. 82-85.
 24. SP 318.1325800.2017. Code of rules. Forest roads. Rules of operation of 26.06.17 g. // Dostup iz sprav.- pravovoj sistemy «Konsorcium Kodeks». URL:
<https://docs.cntd.ru/document/556610333> (data obrashcheniya: 07.02.2024).
 25. SP 288.1325800.2016. A set of rules. Forest roads. Rules of design and construction of 17.06.17 g. // Dostup iz sprav.- pravovoj sistemy «Konsorcium Kodeks». URL:
<https://docs.cntd.ru/document/456069592> (data obrashcheniya: 07.02.2024).
 26. Bouchard M., Pothier D. Long-Term Influence of Fire and Harvesting on Boreal Forest Age Structure and Forest Composition in Eastern Québec // Forest Ecology and Management. 2011. V. 261, iss. 4. P. 811-820.
 27. Carrasco L.R., Nghiem T.P.L., Sunderland T., Koh L.P. Economic Valuation of Ecosystem Services Fails to Capture Biodiversity Value of Tropical Forests. Biological Conservation. 2014. V. 178. P. 163-170.
 28. Conard S.G., Sukhinin A.I., Stocks B.J., Cahoon D.R., Davidenko E.P., Ivanova G.A. Determining Effects of Area Burned and Fire Severity on Carbon Cycling and Emissions in Siberia // Climatic Change. 2002. V. 55, iss. 1-2. P. 197-211.
 29. Hansen A.J., Spies T.A., Swanson F.J., Ohmann J.L. Conserving Biodiversity in Managed Forests: Lessons from Natural Forests // BioScience. 1991. V. 41, iss. 6. P. 382-392.
 30. Schaich H., Milad M. Forest Biodiversity in a Changing Climate: Which Logic for Conservation Strategies? // Biodiversity and Conservation. 2013. V. 22, iss. 5. P. 1107-1114.
 31. Kuvaldin B.I. Forestry roads (Construction and maintenance). M.: Lesnaya prom-st', 1976. 95 p.
 32. Zorin M.V., Grigor'ev I.V. History and prospects of development of collapsible coatings for forest roads and technological corridors // Vestnik ASAU (Scientific journal of Arctic State Agrotechnological University). 2022. № 3 (7). P. 121-138.
 33. Grin'ko O.I., Dolzhikov I.S., Grigor'eva O.I. Forest fire complexes based on minitractors // Aktual'nye problemy lesnogo hozyajstva i derevoprerabotki: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (24-28 apr. 2023 g.). Kazan', 2023. P. 101-105.
 34. Lorenc A.S., Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Ryabuhin P.B. Investigation of the use of needle filters as part of vacuum installations to increase the effectiveness of fighting forest fires // Systems. Methods. Technologies. 2023. № 4 (60). P. 124-129.
 35. Grigor'eva O.I., Lorenc A.S., Grigor'ev I.V. Occupational safety and safety during operation of an iglofiltration plant for extinguishing forest fires // Safety and labor protection in logging and woodworking industries. 2023. № 1. P. 37-43.