

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5963

УДК 625.711.84: 629.357

Статья

Математическая модель определения оптимального месторасположения лесных пожарно-химических станций с учётом уровня развития транспортных сетей на территории лесного фонда

Ковалев Рудольф Николаевич

доктор технических наук, профессор, Уральский государственный лесотехнический университет (Российская Федерация), kir9624@yandex.ru

Еналеева-Бандура Ирина Михайловна

кандидат технических наук, старший преподаватель, Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева (Российская Федерация), melnikov1978@inbox.ru

Баранов Александр Николаевич

кандидат технических наук, доцент, Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева (Российская Федерация), aleksandr-baranov-55@mail.ru

Григорьева Ольга Ивановна

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова (Российская Федерация), grigoreva_o@list.ru

Григорьев Игорь Владиславович

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), silver73@inbox.ru

Получена: 2 октября 2021 / Принята: 10 декабря 2021 / Опубликовано: 19 декабря 2021

Аннотация: В современных условиях управления лесами и ведения лесного хозяйства особое значение приобретают вопросы не только рациональности в аспекте многоцелевого лесопользования, но и сохранности лесов. Данная сохранность во многом зависит от качества функционирования системы охраны и защиты лесов от пожаров в целом и от рационального размещения пожарно-химических лесных станций в частности. Именно лесные пожары являются главным дестабилизирующим фактором состояния лесных экосистем, в борьбе с которыми особое значение имеет уровень развития транспортной сети

на территории лесного фонда. Следовательно, совершенствование и разработка инструментов повышения эффективности охраны лесов от пожаров, с учётом уровня развития лесотранспортной сети, является одной из первоочередных задач лесной отрасли. В этой связи в статье обозначена необходимость скорейшей ликвидации очагов возгорания при возникновении лесных пожаров; определены причины неэффективности доставки наземных сил и средств пожаротушения к очагам возгорания; отмечены возможные рычаги повышения эффективности наземной охраны лесов; указана роль оптимального месторасположения пожарно-химических станций в процессе достижения эффективности функционирования системы охраны и защиты лесов от пожаров; разработана математическая модель определения оптимального месторасположения лесных пожарно-химических станций с учётом уровня развития транспортных сетей на территории лесного фонда, обозначены её преимущества и область применения. В основу методологической разработки положены инструментарию экономико-математического моделирования, теории вероятности, комбинаторики и элементы теории массового обслуживания на базе поиска центра тяжести потокового процесса.

Ключевые слова: математическая модель, лесотранспортная сеть, лесные пожарно-химические станции, лесные экосистемы, лесные пожары, эффективное плечо доставки сил и средств пожаротушения

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5963

Article

Mathematical model for determining the optimal location of forest fire and chemical stations taking into account the level of development of transportation networks on the territory of the forest fund

Rudol'f Kovalev

D. Sc. in engineering, professor, Ural State Forest Engineering University (Russian Federation), kir9624@yandex.ru

Irina Enaleeva-Bandura

Ph. D. in engineering, senior lecturer, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (Russian Federation), melnikov1978@inbox.ru

Aleksandr Baranov

Ph. D. in engineering, associate professor, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (Russian Federation), aleksandr-baranov-55@mail.ru

Olga Grigoreva

Ph. D. in agriculture, associate professor, St. Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation), grigoreva_o@list.ru

Igor Grigorev

D. Sc. in engineering, professor, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), silver73@inboxl.ru

Received: 2 October 2021 / Accepted: 10 December 2021 / Published: 19 December 2021

Abstract: In modern conditions of forest management and forestry the issues of both multipurpose forest management rationality and forests preservation are of particular importance. Forest preservation largely depends on the quality of the system of conservation and protection of forests from fires in general, and on the rational placement of fire-chemical forest stations in particular. Since forest fires are the main destabilizing factor of forest ecosystems the transportation network development within the forest fund area is of particular importance. Consequently, the level of the forest transportation network development should be taken into account to improve and develop the efficiency of forest protection from fires. In

this regard, the article indicates the need for the earliest possible elimination of combustion centers in the event of forest fires. The authors determine the causes for failure to deliver ground forces and fire extinguishing means to the fires. Possible options to increase the efficiency of land-based forest protection services are noted and the role of the fire-chemical stations optimal location in this process is indicated. A mathematical model has been developed to determine the optimal location of forest fire-chemical stations, taking into account the level of development of transportation networks on the forest fund area, its advantages and applicable scope are indicated. The methodological investigation is based on the economic and mathematical modeling, probability theory, combinatorics and elements of the queuing theory based on the search for the center of gravity of the streaming process.

Keywords: mathematical model, forest transportation network, forest fire-chemical stations, forest ecosystems, forest fires, effective shoulder of delivery of firefighting forces and equipment

1. Введение

Большая часть хвойных лесов бореальной зоны имеет пирогенную природу [1], [2], но всё же лесные пожары можно обозначить как одну из наиболее мощных экологических катастроф и определить как один из сильнейших негативных факторов, оказывающих разрушительное воздействие на лесные экосистемы. В этой связи тушение лесных пожаров необходимо, но ликвидация пожаров с привлечением к тушению очагов возгорания воздушных сил высокочрезвычайно затратна. Преимущественно привлечение к ликвидации лесных пожаров воздушных сил связано с недостаточной эффективностью использования наземных сил и средств охраны и защиты лесов, а также обуславливается слабой развитостью транспортной инфраструктуры лесных территорий.

Из наземных средств для тушения лесных пожаров, в условиях отсутствия дорог, могут использоваться противопожарные вездеходы и форвардеры (фото 1—3), но и их проходимость ограничена по рельефным и почвенно-грунтовым условиям [3—5]. Кроме того, они практически не встречаются в лесах России. Крайне слабая развитость дорожной сети в лесах Российской Федерации сдерживает не только борьбу с лесными пожарами, но и все другие работы, связанные с лесозаготовкой и лесовосстановлением [6—10]. Это значительно усложняет выполнение обязанностей арендаторов лесных участков и лесничеств [11], [12] в области борьбы с лесными пожарами.



Фото 1. Пожарная станция на базе гусеничного вездехода ЧЕТРА ТМ-140 (<https://ks45.ru/vezdekhodspecial/vehicles/vezdechodi-spetsialnogo-naznacheniya/pozharnaya-nasosnaya-stantsiya-na-baze-gusenichnogo-vezdechoda-chetra-tm-140.html>)

Foto 1. Fire station based on the CHETRA TM-140 tracked all-terrain vehicle (<https://ks45.ru/vezdekhodspecial/vehicles/vezdechodi-spetsialnogo-naznacheniya/pozharnaya-nasosnaya-stantsiya-na-baze-gusenichnogo-vezdechoda-chetra-tm-140.html>)



Фото 2. Противопожарный форвардер TimberPro (фото компании TimberPro <http://timberpro.com/>)

Foto 2. TimberPro Fire forwarder (photos from the company <http://timberpro.com/>)



Фото 3. Противопожарный форвардер Ponsse (фото Григорьева И. В.)

Foto 3. Ponsse Fire forwarder (photo of Igor Grigorev)

В этой связи очевидно, что повышение эффективности применения в целях ликвидации лесных пожаров наземных сил и средств пожаротушения является актуальной не только научной, но и практической задачей. Повышение отмеченной эффективности во многом зависит от своевременной доставки сил и средств пожаротушения к очагу возгорания. В свою очередь, доставка спецтехники и пожарных бригад, не выходящая за нормативные временные пределы, находится в прямой зависимости от рационального территориального размещения пожарно-химических станций (ПХС). Учитывая обозначенное обстоятельство, выбор месторасположения данных станций должен носить объективный, научно обоснованный характер в целях эффективной интеграции всех лесопожарных сил для

успешной борьбы с пожарами, в которой ключевую роль играет уровень развития лесотранспортной сети.

2. Материалы и методы

Общеизвестно, что эколого-экономический ущерб, причинённый землям лесного фонда посредством возникновения лесных пожаров, является интегральной величиной, стоимостное значение которой склонно к изменению во времени и пространстве в зависимости от скорости послепожарного восстановления лесных площадей, подвергшихся выгоранию. Данная величина генерирует следующие составляющие: совокупные издержки, связанные с охраной лесных территорий, и экономическую стоимость лесных ресурсов, погибших в результате пожара (данный показатель определяет снижение стоимости пройденной пожаром лесной территории).

В целях наглядности катастрофического воздействия лесных пожаров на земли лесного фонда нами приводятся данные МЧС Российской Федерации [13] (таблица 1).

Таблица 1. Стоимостная оценка ущерба от лесных пожаров в Российской Федерации

Table 1. Cost estimation of damage from forest fires in the Russian Federation

Величина ущерба от лесных пожаров в стоимостном выражении, млрд руб. в год	Годы
≈ 20,0	2019
16,9	2018
25,2	2017
23,7	2016
56,4	2015
23,8	2014

Согласно данным таблицы 1 и источнику [13], стоимостная оценка ущерба лесному хозяйству ввиду возникновения пожаров состоит из следующих потерь в денежном и процентном отношении к величине общего ущерба: потери древесного сырья составили от 3 до 7 млрд руб. (17,86 %); потери от гибели животных — от 1,5 до 5 млрд руб. (12,76 %); ущерб от загрязнения окружающей среды продуктами горения — от 0,5 до 1,5 млрд руб. (3,82 %); расходы на тушение и последующую расчистку горелых площадей, на потери от гибели животных, на ликвидацию загрязнений продуктами горения окружающей среды — от 8 до 15 млрд руб. (38,27 %); затраты на восстановление леса и т. п. — от 5 до 10,7 млрд руб. (27,29 %).

Следует отметить, что, согласно источнику [21], в среднем 15 % от величины общих расходов на охрану лесов составляют средства на создание противопожарных объектов, включая уход за ними.

Учитывая вышеизложенное, очевидно, что разработку мероприятий по снижению величины указанного ущерба можно определить как актуальную научную задачу. Общеизвестно, что показатель величины предотвращённого ущерба от воздействия пожаров лесным экосистемам находится в прямой зависимости от успешной ликвидации пожара на территории лесных земель. Под успешной ликвидацией следует понимать: раннее обнаружение очага возгорания; в кратчайшие сроки доставка спецтехники и пожарных бригад к очагу горения; обеспечение посредством активной борьбы с огнём минимального прироста периметра лесного пожара. Также в аспекте рассмотрения возможных факторов повышения эффективности пожаротушения на землях лесного фонда следует отметить следующее: менее затратным в денежном эквиваленте способом ликвидации лесных пожаров является использование при пожаротушении наземных сил и средств. Следовательно, основным показателем, определяющим успешную ликвидацию лесного пожара при использовании наземных сил, является качественный критерий, поставленный на минимум временных затрат, связанных с пожаротушением. В свою очередь, минимизация отмеченных временных затрат находится в тесном сопряжении со своевременной доставкой сил и средств пожаротушения к очагу возгорания.

Очевидно, что своевременность доставки наземных сил и средств пожаротушения к очагу возгорания преимущественно зависит от уровня развития транспортной сети на территории лесного фонда и рационального размещения инфраструктурных объектов, связанных с охраной и защитой лесов. Среди отмеченных инфраструктурных объектов основными на территориях лесного фонда являются пожарно-химические станции.

ПХС представляют собой территориальные специализированные подразделения в районах использования наземных сил и средств пожаротушения. Задачи своевременного обнаружения лесного пожара и его успешной ликвидации лежат именно на ПХС. Данное обстоятельство определяет высокую важность указанного инфраструктурного объекта в системе охраны и защиты лесов и обуславливает необходимость научного обоснования в аспекте принятия решений относительно географического размещения данных станций.

Обзор научной литературы по обозначенной тематике [14—19], [21], [23—25] выявил, что большинство исследований в области оптимизации функционирования системы охраны и защиты лесов посвящено разработке эффективных комплексов организационно-технических мероприятий, ориентированных на успешную борьбу с лесными пожарами. Например, в работах [16—18], [23] представлены сравнительный анализ эколого-экономической эффективности и расчёт нормативов технического оснащения ПХС. В исследовании [14] по данному вопросу отмечено: «Бесспорно, эколого-экономические аспекты и оптимизация важны при проектировании ПХС, но при этом отсутствует обоснование рационального территориального размещения станций ПХС». Также

в публикации [14] отмечается, что при планировании размещения ПХС необходимо учитывать степень пожарной опасности охраняемого объекта; уровень развития лесотранспортной сети и временные нормативы доставки спецтехники и пожарных бригад к очагу возгорания. Разработанная в работе [14] математическая модель, несомненно, обладает весомыми преимуществами, ввиду учёта в ней вышеперечисленных факторов. Но аспект взаимозависимости лесотранспортной сети и временных затрат на доставку сил и средств пожаротушения в данной модели учтён недостаточно подробно, ввиду отсутствия в методологической разработке показателей изменения скоростного режима (а также факторов снижения среднетехнических скоростей) спецтехники и пожарных бригад при движении по различным ступеням существующей лесной транспортной сети; временных пределов на доставку сил и средств пожаротушения в зависимости от изменения природно-климатических условий в регионе. В этой связи остался недостаточно раскрытым и вопрос определения эффективного плеча доставки сил и средств пожаротушения к очагу возгорания.

Таким образом, выявлена необходимость разработки методологического аппарата, обеспечивающего определение оптимального месторасположения лесных пожарно-химических станций на базе расчёта эффективного плеча доставки сил и средств пожаротушения к очагу возгорания с учётом уровня развития транспортных сетей на территории лесного фонда.

3. Результаты

В статье приведена разработанная авторами математическая модель определения рационального месторасположения лесных пожарно-химических станций, критерием оптимальности данной модели является минимизация временных затрат, связанных с доставкой сил и средств пожаротушения от пожарно-химической станции до очага возгорания. Целевая функция вычисления суммарного времени на доставку спецтехники и пожарных бригад к очагу возгорания представлена пределом, ограничивающим фактические временные затраты доставки сил и средств пожаротушения нормативным временем на отмеченную доставку. В свою очередь, нормативное время доставки необходимых сил и средств пожаротушения к очагу возгорания находится в прямой зависимости от степени пожарной опасности в лесах. Данная степень, согласно работе [12], подразделяется на пять классов (таблица 2).

Опираясь на табличные данные, в целях учёта при моделировании аспекта наличия в лесном фонде участков с различными классами пожарной опасности, в разработанной модели содержатся три суммирования (по 1, 2-й и 3—5-й категориям природной пожарной опасности), согласно трём пределам значений нормативного времени доставки сил и средств пожаротушения к очагу возгорания.

Таблица 2. Взаимозависимость классов пожарной опасности в лесах и нормативного времени на доставку сил и средств пожаротушения

Table 2. The interdependence of fire hazard classes in forests and the regulatory time for the delivery of fire extinguishing forces and means

Класс пожарной опасности	Степень пожарной опасности	Величина показателя пожарной опасности, °С	$t_{\text{норм}}, \text{ч}$
I	Высокая	Более 10 000 (чрезвычайная горимость)	0,5—1*
II	Выше средней	4001—10 000 (высокая горимость)	1—2
III	Средняя	1001—4000 (средняя горимость)	2—3
IV	Ниже средней	301—1000 (слабая горимость)	3
V	Низкая	0—300 (полная негоримость)	3

Примечание. * При ветре более 5 м/с нормативное время должно быть сокращено в два раза. Если нет возможности сократить это время, то пропорционально увеличивается количество бригад и техники [1].

Таким образом, временные затраты доставки спецтехники и пожарных бригад к очагам возгораний нами предлагается вычислять согласно выражению (1):

$$t_{\text{сум}}^{\text{дост}} = \lim_{t_{\text{норм}}} \sum_{k=1}^K \left(\frac{l_u}{v_u \cdot \prod_{k_u=1}^K k_{ku}} + \sum_{i=0}^m \frac{l_m^i}{v_m^i \cdot \prod_{k_{mi}=1}^K k_{mi}} + \frac{l_b^i}{v_b^i \cdot \prod_{k_{bi}=1}^K k_{bi}} + \frac{l_y^i}{v_y^i \cdot \prod_{k_{yi}=1}^K k_{yi}} + \frac{l_{\pi}^i}{v_{\pi}^i \cdot \prod_{k_{\pi i}=1}^K k_{\pi i}} + \sum_{j=0}^n \frac{l_m^j}{v_m^j \cdot \prod_{k_{mj}=1}^K k_{mj}} + \frac{l_b^j}{v_b^j \cdot \prod_{k_{bj}=1}^K k_{bj}} + \frac{l_y^j}{v_y^j \cdot \prod_{k_{yj}=1}^K k_{yj}} + \frac{l_{\pi}^j}{v_{\pi}^j \cdot \prod_{k_{\pi j}=1}^K k_{\pi j}} + \sum_{r=0}^l \frac{l_m^r}{v_m^r \cdot \prod_{k_{mr}=1}^K k_{mr}} + \frac{l_b^r}{v_b^r \cdot \prod_{k_{br}=1}^K k_{br}} + \frac{l_y^r}{v_y^r \cdot \prod_{k_{yr}=1}^K k_{yr}} + \frac{l_{\pi}^r}{v_{\pi}^r \cdot \prod_{k_{\pi r}=1}^K k_{\pi r}} \right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $t_{\text{норм}}$ — нормативное время доставки людей и спецтехники, которое не должно превышать временной норматив. В случае, если бригада не успевает прибыть вовремя на место пожара, подключается помощь с воздуха; где l_m, l_b, l_y — расстояние доставки спецтехники и пожарных бригад соответственно по магистрали, ветке и усу, км; l_u — расстояние от ПХС до границы лесничества, км; l_{π} — расстояние по пересечённой местности (пешее) до центра охраняемого объекта, км. Следует отметить, что значение данного показателя является определяющим для оценки уровня развития существующей транспортной сети.

В этой связи обозначим, что если значение данного показателя является завышенным относительно нормативного времени доставки спецтехники и пожарных бригад либо указанное значение обращается в ноль, ввиду невозможности доставки неземных сил и средств пожаротушения в центральную точку охраняемого объекта, обусловленной бездорожьем, то необходимо строительство дополнительных лесных дорог лесохозяйственного назначения, благодаря которым будет обеспечиваться доставка сил

и средств пожаротушения в нормативное время в отдалённые места [15]; v_m, v_b, v_y — среднетехнические скорости движения спецтехники соответственно по магистрали, ветке и усу, км/ч; v_u — скорость движения спецтехники от пожарного пункта до границы лесничества, км/ч; v_{π} — скорость специальных бригад и пожаротушающей техники по пересечённой местности (пешая) принимается, согласно работе [15], 4 км/ч; k — тип спецтехники, $k \in [1, \dots, K]$; i — лесоучастки 1-й категории природной пожарной опасности, $i \in [0, \dots, m]$; j — лесоучастки 2-й категории природной пожарной опасности, $j \in [0, \dots, n]$; r — лесоучастки 3—5-й категорий природной пожарной опасности, $r \in [0, \dots, l]$; $\prod_{k=1}^K k$ — произведение факторов, снижающих скорость доставки спецтехники и пожарных бригад к очагу возгорания. К данным факторам относятся: изменения направления уклонов лесовозной дороги; скорость ветра; интенсивность движения; метеорологические условия; степень ровности дорожного покрытия и др. [24].

Следует отметить, что для различных участков лесных дорог характерен разный набор указанных факторов, поэтому в разработанной модели каждая среднетехническая скорость корректируется на отмеченное снижающее её влияние. Подобный подход позволяет выполнить оптимизационные расчёты с наименьшими погрешностями.

Согласно постановке целевой функции, расчётное значение эффективного плеча размещения пожарно-химической станции от охраняемого лесного фонда определяется выражением (2):

$$l_u^{\text{расч}} = v_u \times \left[\frac{(t_{\text{норм}}^i \cdot ((\sum_{i=0}^m t_m^i + t_b^i + t_y^i + t_{\pi}^i) - t_{\text{норм}}^i))}{t_{\text{норм}}^i} + \frac{(t_{\text{норм}}^j \cdot ((\sum_{j=0}^n t_m^j + t_b^j + t_y^j + t_{\pi}^j) - t_{\text{норм}}^j))}{t_{\text{норм}}^j} + \frac{(t_{\text{норм}}^r \cdot ((\sum_{r=0}^l t_m^r + t_b^r + t_y^r + t_{\pi}^r) - t_{\text{норм}}^r))}{t_{\text{норм}}^r} \right] \quad (2)$$

где t_m, t_b, t_y, t_{π} — время движения спецтехники и пожарных бригад по магистрали, ветке, усу и по пересечённой местности (пешее) соответственно, ч.

Математическая модель характеризуется следующими ограничениями:

1. Соответствие фактического времени прибытия спецтехники и пожарных бригад к очагу возгорания времени доставки сил и средств пожаротушения, принятому в нормативах:

$$\begin{cases} t_u + t_m^i + t_b^i + t_y^i + t_{\pi}^i \leq t_{\text{норм}}^i \\ t_u + t_m^j + t_b^j + t_y^j + t_{\pi}^j \leq t_{\text{норм}}^j \\ t_u + t_m^r + t_b^r + t_y^r + t_{\pi}^r \leq t_{\text{норм}}^r \end{cases} \quad (3)$$

2. Естественное снижение среднетехнических скоростей спецтехники и пожарных бригад:

$$\prod_{k=1}^K k \geq 0. \quad (4)$$

3. Естественная не отрицательность переменных:

$$\begin{aligned} v_m, v_b, v_y, v_u \geq 0; l_m, l_b, l_y, l_{\pi}, l_u^{\text{факт}}, l_u^{\text{расч}} \geq 0; \\ t = 0, \dots, T; k = 1, \dots, K. \end{aligned} \quad (5)$$

Также необходимо обозначить дополнительное ограничение, которое может возникнуть при решении данной оптимизационной задачи [невыполнение условия (3)]. Указанное ограничение обуславливается возможностью возникновения ситуации не покрытия,

отмеченного в нормативах [12], [14], [15], временных затрат на доставку сил и средств пожаротушения к очагу возгорания, ввиду необходимости удлинения расчётного значения эффективного плеча месторасположения ПХС. Данная необходимость появляется в результате слишком отдалённого расположения друг от друга наиболее пожароопасных лесоучастков, в этой связи время реагирования на пожар одной пожарно-химической станцией будет превышать допустимые нормативные пределы, либо в зоне тяготения эффективного плеча местность не соответствует возможности размещения ПХС (заболоченность и т. п.), что также будет способствовать повышению временных затрат на доставку лесопожарных сил к очагу возгорания [14]. В этом случае необходимо размещение более чем одной станции ПХС. Планирование оптимального числа пожарно-химических станций следует определять посредством аналитического анализа: природно-географических условий региона; уровня развития существующей транспортной сети на территории охраняемого объекта (в случае недостаточной развитости, в аспекте эффективности пожаротушения, существующей лесотранспортной сети необходимо планирование по созданию дополнительных лесных дорог противопожарного назначения). После определения необходимого количества ПХС, в целях повышения эффективности охраны лесного фонда следует определить их оптимальное месторасположение посредством использования вышеописанного методологического аппарата.

4. Обсуждение и заключение

Разработанная математическая модель определения оптимального месторасположения лесных пожарно-химических станций, с учётом уровня развития транспортной сети на территории лесного фонда, позволяет осуществить выбор наиболее рационального территориального размещения ПХС в целях сокращения временных издержек при доставке спецтехники и пожарных бригад к очагу возгорания. Предлагаемая методологическая разработка обладает гибкостью, позволяющей её применять в различных вариантах сопряжения технологических аспектов и природно-климатических условий, и может быть рекомендована к использованию для проектирования регионального противопожарного лесообустройства. Кроме этого, изложенный подход может быть использован для проектирования другой лесной инфраструктуры, например лесных терминалов [26].

Список литературы

1. *Morkovina S. S., Kunickaya O., Dolmatova L., Markov O., Nguyen V. L., Baranova T., Shadrina S., Grin'Ko O.* Comparative analysis of economic aspects of growing seedlings with closed and open root systems: the experience of Russia // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2021. Т. 18, № 2. С. 19—26.
2. *Kunickaya O., Tanyukevich V., Khmeleva D., Kulik A., Runova E., Savchenkova V., Voronova A., Lavrov M.* Cultivation of the targeted forest plantations // *Journal of Environmental Treatment Techniques*. 2020. Т. 8, № 4. С. 1385—1393.

3. Бурмистрова О. Н., Просужих А. А., Хитров Е. Г., Куницкая О. А., Лунева Е. Н. Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничениях воздействия на почвогрунты // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. № 3 (381). С. 101—116.
4. Бурмистрова О. Н., Просужих А. А., Хитров Е. Г., Рудов С. Е., Куницкая О. А., Калита О. Н. Влияние переменных коэффициентов сопротивления движению и сцепления на производительность форвардера // Деревообрабатывающая промышленность. 2021. № 1. С. 3—16.
5. Бурмистрова О. Н., Тетеревлева Е. В., Куницкая О. А. Моделирование взаимодействия колёсного движителя сверхнизкого давления со слабонесущей опорной поверхностью // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 4 (44). С. 95—101.
6. Казаков Н. В., Абузов А. В. Технические средства автоматизации управления процессами промышленного лесопользования // Вестник АГАТУ. 2021. № 1 (1). С. 50—55.
7. Герц Э. Ф., Уразова А. Ф., Курдышева Е. В., Уразов П. Н. Эффективность защитных лесных полос вдоль железной дороги // Вестник АГАТУ. 2021. № 1 (1). С. 56—60.
8. Ахтямов Э. Р., Кручинин И. Н., Кручинина Е. И., Лабыкин А. А. Асфальтобетонные покрытия лесных лесовозных дорог с улучшенными транспортно-эксплуатационными показателями // Вестник АГАТУ. 2021. № 1 (1). С. 61—65.
9. Швецова В. В. Особенности механизированной заготовки древесины в современных условиях // Вестник АГАТУ. 2021. № 2 (2). С. 59—66.
10. Куницкая О. А., Просужих А. А., Каляшов В. А. Эколого-экономическая эффективность эксплуатации форвардеров // Вестник АГАТУ. 2021. № 2 (2). С. 44—53.
11. Российская Федерация. Законы. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 02.07.2021, с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2021). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/ (дата обращения: 23.09.2021).
12. Методические рекомендации по применению сил и средств для тушения лесных пожаров (утв. МЧС России № 2-4-87-9-18 от 16.07.2014). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_246655/ (дата обращения: 28.09.2021).
13. Лесные пожары в России. Статистика и антирекорды // ТАСС-ДОСЬЕ. 29.07.2019. URL: <https://tass.ru/info/6712527>.
14. Громов И. А., Тюрин Н. А. Модель оптимизации структуры лесной транспортной сети с учётом противопожарной функции лесных дорог // Сборник статей по материалам научно-технической конференции Института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2018 г. СПб.: СПбГЛТУ, 2019. С. 125—129.
15. Момот А. В. Проектирование противопожарных лесных дорог по критерию времени доставки сил и средств пожаротушения // Лесотехнический журнал. 2016. № 1. С. 116—122.
16. Сныткин Г. В. Лесные пожары и борьба с ними на Крайнем Северо-Востоке Сибири: Дис. ... д-ра с/х наук. М., 2002. 314 с.
17. Подольская Е. С., Ковганко К. А., Ершов Д. В., Шуляк П. П., Сучков А. И. Использование модели транспортной сети региона для оценки времени и расстояния наземной доставки сил и средств до лесных пожаров // Вопросы лесной науки. 2019. Т. 2 (1). С. 1—28.
18. Матвеева А. А., Рулев А. С. Эколого-экономические аспекты проектирования региональной сети ПХС для регулирования пожароопасной обстановки // Вестник АПК Ставрополя. 2016. № 3 (23). С. 251—255.
19. Гаврилова О. И., Пак К. А. Естественное восстановление леса после пожаров в Республике Карелия // Успехи современного естествознания. 2017. № 12. С. 38—44.

20. Ковалев Р. Н., Баранов А. Н., Иванов В. А., Чжан С. А. Интегральная математическая модель оценки эколого-экономического ущерба лесных экосистем от пожаров с учётом уровня развития транспортной сети // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 4 (48). С. 156—161.
21. Хильченко Н. В., Потапова Е. В. [и др.]. Оценка эколого-экономического ущерба (методы и практика): Препринт. Екатеринбург: УрО РАН, Институт экономики, 2004. 67 с.
22. Ковалев Р. Н., Еналеева-Бандура И. М., Никончук А. В. Оценка влияния пожаров на лесные экосистемы с учётом уровня развития лесотранспортной сети // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. № 4. С. 131—149.
23. Коришунов Н. А., Савченкова В. А., Провин К. Н. Оценка минимальных требований по техническому оснащению лесопожарных групп // Вестник Красноярского государственного университета. 2017. Вып. 9. С. 63—69.
24. Леонович И. И., Вырко Н. П., Демидко М. Н. Влияние состояния транспортных путей на эффективность работы лесовозных автопоездов на вывозке заготовленного леса // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2014. № 2. С. 37—39.
25. North M. P., Stephens S. L., Collins B. M., Agee J. K., Franklin J. F. Environmental Science // Reform forest fire management. Insights. USA, 2015. P. 1280—1281.
26. Куницкая О. А., Помигуев А. В. Переработка древесины на мобильных линиях лесных терминалов // Вестник АГАТУ. 2021. № 3 (3). С. 82—99.

References

1. Morkovina S. S., Kunickaya O., Dolmatova L., Markov O., Nguyen V. L., Baranova T., Shadrina S., Grin'ko O. Comparative analysis of economic aspects of growing seedlings with closed and open root systems: the experience of Russia. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2021, vol. 18, no 2, pp. 19—26.
2. Kunickaya O., Tanyukevich V., Khmeleva D., Kulik A., Runova E., Savchenkova V., Voronova A., Lavrov M. Cultivation of the targeted forest plantations. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 2020, vol. 8, no 4, pp. 1385—1393.
3. Burmistrova O. N., Prosuzhikh A. A., Khitrov E. G., Kunitskaya O. A., Luneva E. N. Theoretical studies of forwarders' productivity under restrictions of impact on soils. *News of higher educational institutions. Forest Magazine*, 2021, no 3 (381), pp. 101—116. (In Russ.)
4. Burmistrova O. N., Prosuzhikh A. A., Khitrov E. G., Rudov S. E., Kunitskaya O. A., Kalita O. N. Influence of variable coefficients of resistance to movement and coupling on forwarder performance. *Woodworking industry*, 2021, no 1, pp. 3—16. (In Russ.)
5. Burmistrova O. N., Teterevleva E. V., Kunitskaya O. A. Modeling of the interaction of an ultra-low pressure wheel mover with a weakly bearing support surface. *The system. Methods. Technologies*, 2019, no 4 (44), pp. 95—101. (In Russ.)
6. Kazakov N. V., Abuzov A. V. Technical means of automation of industrial forest management processes. *Bulletin of AGATU*, 2021, no 1 (1), pp. 50—55. (In Russ.)
7. Hertz E. F., Urazova A. F., Kurdysheva E. V., Urazov P. N. The effectiveness of protective forest strips along the railway. *Bulletin of AGATU*, 2021, no 1 (1), pp. 56—60. (In Russ.)
8. Akhtyamov E. R., Kruchinin I. N., Kruchinina I. N., Labykin A. A. Asphalt concrete coverings of forest logging roads with improved transport and operational indicators. *Bulletin of AGATU*, 2021, no 1 (1), pp. 61—65. (In Russ.)
9. Shvetsova V. V. Features of mechanized harvesting of wood in modern conditions. *Bulletin of AGATU*, 2021, no 2 (2), pp. 59—66. (In Russ.)

10. Kunitskaya O. A., Prosuzhikh A. A., Kalyashov V. A. Ecological and economic efficiency of operation of forwarders. *Bulletin of AGATU*, 2021, no 2 (2), pp. 44—53. (In Russ.)
11. The Russian Federation. Laws. Forest Code of the Russian Federation dated 04.12.2006 No 200-FZ (as amended on 02.07.2021, with amendments and additions, intro. effective from 01.09.2021). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/ (accessed: 23.09.2021). (In Russ.)
12. Methodological recommendations on the use of forces and means to extinguish forest fires (approved by the Ministry of Emergency Situations of Russia No 2-4-87-9-18 of 16.07.2014). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_246655/ (accessed: 28.09.2021). (In Russ.)
13. *Forest fires in Russia. Statistics and anti-records. TASS-DOSSIER*. 29.07.2019. Available at: <https://tass.ru/info/6712527>. (In Russ.)
14. Gromov I. A., Tyurin N. And. Model structure optimization of forest transport network considering firefighting functions of forest roads. *Collection of articles on materials of the scientific conference of the Institute of process machinery and transport the forest according to the results of scientific research 2018*. St. Petersburg, Spbgltu, 2019, pp. 125—129. (In Russ.)
15. Momot A. V. Design of fire-fighting forest roads according to the criterion of the time of delivery of fire extinguishing forces and means. *Forestry engineering journal*, 2016, no 1, pp. 116—122. (In Russ.)
16. Snytkin G. V. Forest fires and fighting them in the far North-East Siberia: Dis. ... Doctor of agricultural Sciences. Moscow, 2002. 314 p. (In Russ.)
17. Podolskaya E. S., Kovganko K. A., Ershov D. V., Shulyak P. P., Suchkov A. I. The Use of a model of the transport network of the region for the estimation of time and distance for the surface transport of forces and means to forest fires. *Issues of forest science*, 2019, vol. 2 (1), pp. 1—28. (In Russ.)
18. Matveeva A. A., Rulev A. S. Ecological and economic aspects of designing a regional network of PCBs for regulating a fire-hazardous situation. *Bulletin of Agroindustrial complex of Stavropol*, 2016, no 3 (23), pp. 251—255. (In Russ.)
19. Gavrilova O. I., Pak K. A. Natural forest restoration after fires in the Republic of Karelia. *Successes of modern natural science*, 2017, no 12, pp. 38—44. (In Russ.)
20. Kovalev R. N., Baranov A. N., Ivanov V. A., Zhang S. A. Integral mathematical model for assessing ecological and economic damage to forest ecosystems from fires taking into account the level of development of the transport network. *The system. Methods. Technologies*, 2020, no 4 (48), pp. 156—161. (In Russ.)
21. Khilchenko N. V., Potapova E. V. [et al.] *Assessment of ecological and economic damage (methods and practice): Preprint*. Yekaterinburg, UrO RAS Institute of Economics, 2004. 67 p. (In Russ.)
22. Kovalev R. N., Enaleeva-Bandura I. M., Nikonchuk A. V. Assessment of the impact of fires on forest ecosystems taking into account the level of development of the forest transport network. *News of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal*, 2021, no 4, pp. 131—149. (In Russ.)
23. Korshunov N. A., Savchenkova V. A., Provin K. N. Assessment of minimum requirements for technical equipment of forest fire groups. *Bulletin of the Krasnoyarsk State University*, 2017, iss. 9, pp. 63—69. (In Russ.)
24. Leonovich I. I., Vyrko N. P., Demidko M. N. The influence of the state of transport routes on the efficiency of logging road trains on the removal of harvested forest. *Trudy BSTU. Forestry and woodworking industry*, 2014, no 2, pp. 37—39. (In Russ.)

25. North M. P., Stephens S. L., Collins B. M., Agee J. K., Franklin J. F. Environmental Science. *Reform forest fire management. Insights*. USA, 2015, pp. 1280—1281.
26. Kunitskaya O. A., Pomiguyev A. V. Wood processing on mobile lines of forest terminals. *Bulletin of AGATU*, 2021, no 3 (3), pp. 82—99. (In Russ.)

© Ковалев Р. Н., Еналеева-Бандура И. М., Баранов А. Н.,
Григорьева О. И., Григорьев И. В., 2021