

Математическая модель определения рационального планирования лесных дорог противопожарного назначения

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

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, Красноярск, Россия

² Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3 км, д. 3, Якутск, Россия

³ Петрозаводский государственный университет, проспект Ленина., д. 33, Петрозаводск, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия

^a melnikov1978@inbox.ru, ^b aleksandr-baranov-55@mail.ru, ^c worb1@mail.ru, ^d silver73@inbox.ru, ^e tihonov@petrsu.ru, ^f grigoreva.o@list.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/0000-0002-5574-1725>,

^e <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

Статья поступила 15.09.2025, принята 05.11.2025

В статье обозначена практическая необходимость осуществления рационального планирования лесных дорог противопожарного назначения в целях повышения эффективности борьбы с лесными пожарами. Помимо анализа специализированной литературы по тематике данной статьи выявлены локальность направлений научных исследований и неполнота перечня факторов, подлежащих учёту при осуществлении планирования лесохозяйственных дорог противопожарного назначения. Данное обстоятельство обусловило необходимость реализации изысканий в области определения наиболее эффективного в практическом применении методологического аппарата для планирования данных дорог. В результате произведенных изысканий было установлено наличие в специализированной литературе нескольких методологических аппаратов, направленных на решение задачи планирования лесных дорог противопожарного назначения, имеющих к этой как прямое, так и косвенное отношение. В статье произведен детальный анализ выявленных в ходе изысканий методологических аппаратов. Исходя из результатов этого анализа выявлены преимущества и недостатки существующих методологических аппаратов планирования лесохозяйственных дорог противопожарного назначения. Кроме того, авторами установлены методологические инструменты создания данных аппаратов, определена действенность применения этих инструментов. На базе выявленных преимуществ, опираясь на установленные учёными-исследователями отношения и зависимости, авторами разработаны концептуальные основы реализации рационального планирования лесных дорог противопожарного назначения. Эти основы базируются на принципе необходимости полноценного обеспечения отдалённых лесоучастков нормативным временем реагирования спасателей и пожарных бригад. Также в статье представлена разработанная авторами математическая модель рационального планирования лесных дорог противопожарного назначения, в основу которой, в качестве базиса, положены выработанные авторами концептуальные основы реализации рационального планирования лесных дорог противопожарного назначения. Базу разработанной модели составляет комплекс методологических инструментов, состоящий из: методов экономико-математического моделирования, приёмов динамического и линейного программирования. В статье приведено аналитическое описание как целевого функционала разработанной модели, так и системы его ограничений. Также в статье обозначены преимущества выработанной модели и отмечена область применения предлагаемой методологической разработки.

Ключевые слова: лесные дороги противопожарного назначения; рациональность; лесная отрасль; планирование; математическая модель.

A mathematical model for determining the rational planning of forest roads for fire-fighting purposes

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

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

² Arctic State Agrotechnological University; 3 km, Bld. 3, Sergelyakhskoye Highway, Yakutsk, Russia

³ Petrozavodsk State University; 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, Russia

⁴ St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

^a melnikov1978@inbox.ru, ^b aleksandr-baranov-55@mail.ru, ^c worb1@mail.ru, ^d silver73@inbox.ru, ^e tihonov@petrsu.ru, ^f grigoreva.o@list.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/0000-0002-5574-1725>,

^e <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

Received 15.09.2025, accepted 05.11.2025

The article outlines the practical need for rational planning of forest fire-fighting roads in order to increase the effectiveness of forest fire control. Through the analysis of specialized literature on the subject of this article, the locality of research directions and the incompleteness of the list of factors to be taken into account when planning forest roads for fire-fighting purposes have been identified. This situation necessitated the implementation of research in the field of determining the most effective methodological framework for planning these roads in practical use. As a result of the conducted research, it is established that there are several methodological devices in the specialized literature aimed at solving the problem of planning forest roads for fire-fighting purposes, which are both directly and indirectly related to this. The article provides a detailed analysis of the methodological tools identified during the research. Based on the results of this analysis, the advantages and disadvantages of existing methodological devices for planning forest roads for fire-fighting purposes have been identified. In addition, the methodological tools have been established for creating these devices, determining the effectiveness of the use of these tools. Based on the identified advantages, based on the relationships and dependencies established by research scientists, a conceptual framework for the implementation of rational planning of forest roads for fire-fighting purposes has been developed. These fundamentals are based on the principle of the need to fully provide remote forest sites with the standard response time of special equipment and fire brigades. The article also presents a mathematical model developed by the authors for the rational planning of forest roads for fire-fighting purposes, which is based on the conceptual foundations for the implementation of rational planning of forest roads for fire-fighting purposes. The developed model is based on a set of methodological tools, consisting of methods of economic and mathematical modeling, dynamic and linear programming techniques. The article provides an analytical description of both the target functionality of the developed model and the system of its limitations. The article also outlines the advantages of the developed model and highlights the scope of the proposed methodological development.

Keywords: forest roads for fire-fighting purposes; rationality; forest industry; planning; mathematical model.

Введение. Общеизвестно, что одной из самых мощных экологических катастроф, оказывающих негативное влияние на лесные экосистемы, являются лесные пожары. Ежегодно в период пожароопасных сезонов выгорают значительные площади территорий лесного фонда, что влечёт за собой не только экологический, но и экономический ущерб для отрасли, так как зачастую выгорают лесные массивы, содержащие ценные хозяйствственные секции на восстановление, которых потребуется около 100 лет [3]. В этой связи в области обеспечения эффективного управления лесами и реализации рационального, неистощительного, многоцелевого лесопользования перед лесной отраслью остро стоит задача поиска действенных путей повышения качества осуществления борьбы с лесными пожарами. Неоспоримым является тот факт, что более эффективным и менее затратным способом раннего обнаружения очагов горения и тушения лесных пожаров является наземный. В свою очередь для качественной реализации этого способа необходима транспортная доступность территорий лесного фонда, которая обеспечивается наличием достаточно развитой сети лесохозяйственных дорог, дающих возможность своевременной доставки сил и средств пожаротушения к очагам горения. Данное обстоятельство обуславливает потребность в рациональности планирования сети лесных дорог противопожарного назначения.

Но несмотря на существование в практике этой потребности, в современной научной литературе [4–9, 11, 13, 15–16] данному вопросу уделяется незначительное внимание. В этой связи определяется необходимость выработки действенного методологического аппарата, обеспечивающего рациональное планирование сети лесных дорог противопожарного назначения.

Материалы и методы исследования. В современной специализированной литературе [4–9, 11, 13, 15–16] существует небольшое количество методологических разработок, направленных именно на поиск пути рационального планирования лесохозяйственных лесных

дорог в целом, и дорог противопожарного назначения в частности. В основном учёные-исследователи уделяют внимание вопросам: снижения времени на ликвидацию очагов горения, прогнозирования возникновения лесных пожаров, оптимальности технической вооруженности сил и средств пожаротушения, улучшения технических параметров конструкций этих дорог и др. Данное обстоятельство указывает на необходимость более глубокой научной проработки этой задачи. Поэтому в данной статье рассмотрены и проанализированы методологические разработки, имеющие не только прямое, но и косвенное отношение к рациональности планирования противопожарных лесных дорог, ввиду малого количества подобных научных наработок. Следует отметить, что существующие в специализированной литературе подобные разработки в основном созданы на базе математического моделирования. Ввиду того, что в основном данный вид моделирования позволяет в полной мере реализовать системный подход к моделируемому объекту, то есть рассмотреть технологический процесс как целостную систему, что позволяет достоверно установить взаимосвязи и взаимозависимости отдельных составляющих (элементов) этой системы. Так же повсеместное использование математического моделирования, при создании отмеченных методологических разработок, обуславливается тем, что оно даёт возможность реализации эксперимента без вмешательства в функционирование технологического процесса, что обеспечивает избегание нежелательных последствий при неадекватности разработки в практике [17, 18].

Результаты исследования. Перейдём непосредственно к анализу основных существующих в современной научной литературе [4–9, 11, 13, 15–16] методологических разработок (моделей), имеющих отношение к рациональности планирования противопожарных лесных дорог. Аналитическое описание этих разработок приведено в табл. 1.

Таблица 1. Аналитическое описание методологических аппаратов, направленных на решение задачи планирования лесных дорог противопожарного назначения

№ п/п	Авторы модели разработки	Аналитическая формализация модели		Условные обозначения переменных
		Целевая функция	Система ограничений	
1	Н.А. Тюрин, Л.Я. Громская, Т.С. Антонова, О.В. Зубова, В.В. Силецкий	$S = \sum_{i=1}^n k_i^2 \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}$ $k_i = \frac{l_i^t}{l_i^p}$	$\sum_{i=1}^n k_i^2 \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}$ $+ \sum_{j=1}^m k_j^2 \sqrt{(x_0 - x_j)^2 + (y_0 - y_j)^2}$ $+ \sum_{k=1}^l k_k^2 \sqrt{(x_0 - x_k)^2 + (y_0 - y_k)^2}$ $\rightarrow \min;$ $\frac{k_i^2 \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}}{\mathcal{V}} \leq 1, i = 1 \dots n;$ $\frac{k_j^2 \sqrt{(x_0 - x_j)^2 + (y_0 - y_j)^2}}{\mathcal{V}} \leq 2, j = 1 \dots m;$ $\frac{k_k^2 \sqrt{(x_0 - x_k)^2 + (y_0 - y_k)^2}}{\mathcal{V}} \leq 3, k = 1 \dots l;$	S – суммарное плечо транспортировки спецтехники и пожарных бригад до очага возгорания; x_0, y_0 – координаты географического места размещения пожарно-химической станции; x_i, y_i – координаты географического места расположения территорий лесного фонда с учётом класса их пожарной опасности; k_i – коэффициент увеличения плеча транспортировки сил и средств пожаротушения по сети существующих лесных дорог; n – количество охраняемых территорий лесного фонда; l_i^t – плечо транспортировки сил и средств пожаротушения от пожарно-химической станции до очага горения, км; l_i^p – прямое (воздушное) плечо транспортировки сил и средств пожаротушения от пожарно-химической станции до очага горения, км
2	А.В. Момот	$t_{\text{норм}} = \frac{d}{4 \cdot V_n} + \frac{B}{4 \cdot V_{\text{вет}}} + \frac{A}{2 \cdot V_{\text{мар}}} + \frac{L}{V_{\text{мар}}}$	$t_{\text{норм}} \leq 3$ часа.	V_m – скорость транспортировки сил и средств пожаротушения по магистральному пути, $V_{\text{вет}}$ – скорость транспортировки сил и средств пожаротушения по ветке, V_n – скорость транспортировки сил и средств пожаротушения по пересечённой местности (пешая) L – плечо транспортировки от пожарного пункта до границы лесничества
3	И.А. Громов, Н.А. Тюрин	$t_{\text{дп}} = \sum_{i=1}^7 t_i = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7$	$t_3 = \frac{l_i}{v_i}, i = 3,4,5,6,7$	t_1 – временной интервал от возникновения лесного пожара до его обнаружения, ч; t_2 – временной интервал реагирования сил пожаротушения, ч; t_3 – временной интервал на транспортировку спецтехники и пожарных бригад по дорогам общего пользования, ч; t_4 – временной интервал на транспортировку сил и средств пожаротушения по магистральному пути, ч; t_5 – временной интервал на транспортировку спецтехники и пожарных бригад по ветке, ч; t_6 – временной интервал на транспортировку спецтехники и пожарных бригад технологическим усам, ч; t_7 – временной интервал на доставку спецтехники и пожарных бригад по пересечённой местности, ч; l_i – плечо транспортировки спецтехники и пожарных бригад от ПХС до очага горения
4	Е.С. Подольская, К.А. Ковгоанко, Д.В. Ершов, П.П. Шуляк, А.И. Сучков	$T_m = \frac{L3d}{V_c} \cdot 60$	ограничение скоростного режима вне населённых пунктов до 60 км/ч, в пределах населённых пунктов – 25 км/ч.	T_m – время движения с учётом рельефа, мин. $L3d$ – длина с учётом рельефа, км. V_c – скорость с учётом рельефа, км/ч.
5	И.И. Леонович, Н.П. Вырко, М.Н. Демидко	$\mathcal{V} = 50,35 - 4,66G_H$	ограничения отсутствуют	G_H – среднеквадратическая высота неровности дорожного покрытия, см

Анализируя данные таблицы, можно сделать следующие выводы.

– Математическая модель определения места размещения ПХС на территории лесничества (лесопарка), разработанная Н.А. Тюриным, Л.Я. Громской, Т.С. Антоновой, О.В. Зубовой и В.В. Силенским, направлена на поиск оптимального географического месторасположения пожарно-химических станций. Этот поиск базируется на соблюдении временных норм в зависимости от класса пожарной опасности лесоучастков при доставке спецтехники и пожарных бригад к очагам лесных пожаров в отдалённые места охраняемых территорий лесного фонда [4].

Неоспоримым преимуществом этой модели является то, что она позволяет установить эффективное плечо доставки спецтехники и пожарных бригад к очагам лесных пожаров.

По нашему мнению, существенный недостаток этой методологической разработки заключается в том, что в данной модели отсутствует учёт как фактического времени доставки сил и средств пожаротушения по элементам сети лесных дорог, так и факторов, оказывающих влияние на скорость этой доставки.

Инструментами создания модели послужили:

- аналитический метод,
- метод центра тяжести,
- динамическое программирование.

Особый интерес, представляет математическая модель, разработанная А.В. Момотом [5], данная модель направлена именно на поиск рационального планирования противопожарных лесных дорог. В основе этой модели лежит определение степени транспортной доступности отдалённых лесоучастков для своевременной доставки до очагов горения сил и средств пожаротушения.

Неоспоримым достоинством рассматриваемой модели является учёт движения доставки сил и средств пожаротушения по элементам сети лесных дорог.

Но наряду с достоинством модель имеет существенные недостатки, которые заключаются в неучёте, как расстояния, преодолеваемого силами и средствами пожаротушения до водоёмов и искусственных резервуаров с водой по маршрутам следования спецтехники и пожарных бригад, так и факторов, оказывающих влияние на снижение скорости доставки сил и средств пожаротушения.

Инструментами создания модели послужили: аналитический метод, линейное (каноническая форма линейных уравнений) и динамическое программирование.

– Математическая модель, разработанная И.А. Громовым и Н.А. Тюриным [15], позволяет определить суммарное время на ликвидацию очага горения. Для нашей разработки эта модель интересна учётом всех возможных типов дорог и скорости перемещения по ним специальной техники. В качестве недостатков данной модели можно отметить следующие: пренебрежение учётом факторов, снижающих скорость доставки сил и средств пожаротушения, а также в данной модели не учитывается расстояние, преодолеваемое силами и средствами пожаротушения до водоёмов и искусственных резервуаров с водой по маршрутам следования спецтехники и пожарных бригад. Инструментами

создания модели послужили: аналитический метод, линейное и динамическое программирование.

– Математическая модель, разработанная учёными Е.С. Подольской, К.А. Ковгоанко, Д.В. Ершовым, П.П. Шуляком, А.И. Сучковым [7] позволяет оценить время и расстояние наземной доставки сил и средств до лесных пожаров, т. е., направлена на поиск кратчайших расстояний от ПХС до очагов лесных пожаров.

Основным достоинством рассматриваемой модели является учёт как влияния рельефа местности, так и типов лесных дорог на скорость передвижения спецтехники и пожарных бригад.

К недостаткам данной модели можно отнести следующие: неучёт факторов, кроме рельефа местности, оказывающих влияние на скорость передвижения спецтехники и пожарных бригад. Данная модель не предусматривает аспекты планирования создания лесохозяйственных дорог противопожарного назначения, к расчёту принимаются только существующие лесные дороги.

Инструментами создания модели послужили:

- аналитический и картографический метод,
- линейное (каноническая форма линейных уравнений),
- динамическое программирование.

– Математическая модель, разработанная И.И. Леоновичем, Н.П. Вырко, и М.Н. Демидко [14], обеспечивает определение эффективности работы транспорта, с учётом влияния на показатель этой работы качественных параметров транспортных путей. Модель интересна выводом функции определения и расчетом коэффициента ровности гравийного дорожного покрытия, посредством которого производится расчётное естественное снижение скорости транспорта. Несмотря на то, что показатель ровности дорожного покрытия имеет прямое влияние на скорость доставки спецтехники и пожарных бригад к очагу горения [19–21] в большинстве анализируемых моделей [4–9, 11, 13, 15–16 и др.] данный показатель не учитывается.

Подводя итоги произведенному анализу основных методологических разработок в аспекте рациональности планирования сети лесных дорог противопожарного назначения, можно сделать следующие выводы:

– существующие в специальной литературе научно-практические разработки по тематике исследования имеют как неоспоримые преимущества, так и недостатки. Данные недостатки выражаются неполным учётом установленных нами факторов, оказывающих влияние на процесс доставки сил и средств пожаротушения к очагу горения, что обуславливает недостаточную достоверность применения этих моделей в практике;

– в качестве базы для создания более эффективной в практическом применении методологической разработки, можно использовать математическую модель, разработанную А.В. Момотом [4], произведя её модификацию в аспекте ввода в модель неучтённых ранее значимых факторов, рассмотренных выше;

– основным из неучтённых факторов во всех моделях-аналогах является ровность покрытия лесных дорог. По нашему мнению, неучёт данного фактора при расчёте времени доставки сил и средств пожаротушения к очагам лесных пожаров может привнести существенную погрешность в этот расчёт, ввиду снижения скоро-

сти отмеченной доставки по естественным причинам (изменение степени ровности дорожной одежды).

Влияние неровности дорожного покрытия на среднетехнические скорости спецтехники нами предлагается определять согласно установленным И.И. Леоновичем, Н.П. Вырко, и М.Н. Демидко [14] коэффициентам ровности дорожного покрытия.

Приведенные выше результаты учтены и использованы при создании авторской методологической разработки.

Для создания авторской методологической разработки рационального планирования лесных дорог противопожарного назначения была выработана концептуальная постановка этой задачи (рис. 1).

Как показано на рисунке, концептуальные основы реализации рационального планирования лесных дорог противопожарного назначения базируются на необходимости полноценного обеспечения отдалённых участков лесничества нормативным временем реагирования спецтехники и сил пожаротушения, согласно определённых нами основных технологических зависимостей:

— взаимосвязь фактического времени доставки спецтехники и сил пожаротушения к очагам лесных пожаров и скорости распространения этих пожаров

оказывает влияние на размер площади выгорания территории лесного фонда;

— степень пожароопасности лесоучастков, сила и скорость распространения лесного пожара по территории лесных земель определяют временные сроки доставки спецтехники и сил пожаротушения к очагам лесных пожаров [2];

— метеорологические и природно-климатические условия региона оказывают прямое влияние на силу и скорость распространения пожаров по территориям лесных земель [2];

— временная продолжительность движения сил и средств пожаротушения к очагу лесного пожара находится в тесной зависимости от состояния лесных дорог [2–3];

— также метеорологические и природно-климатические условия региона оказывают прямое влияние на скорость передвижения сил и средств пожаротушения к очагу лесного пожара;

— кроме того на скорость передвижения сил и средств пожаротушения к очагу лесного пожара оказывает прямое влияние степень ровности дорожной одежды [22–24].

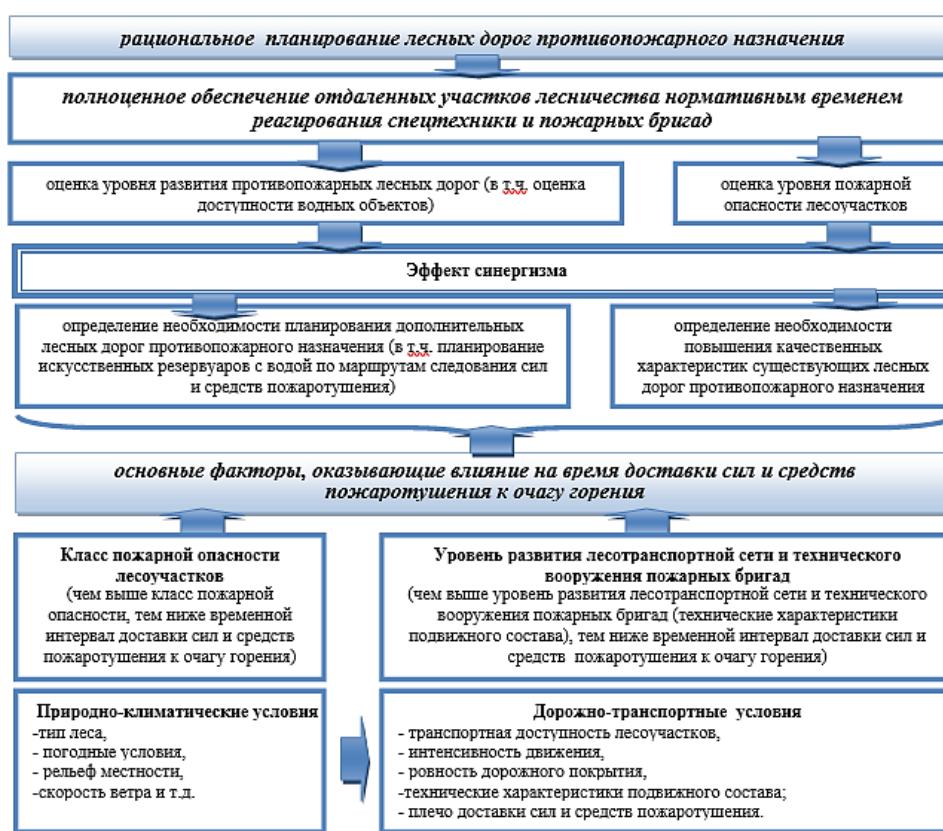


Рис. 1. Концептуальная постановка задачи рационального планирования лесных дорог противопожарного назначения

В свою очередь полноценное обеспечение отдалённых участков лесничества нормативным временем реагирования спецтехники и пожарных бригад должно определяться путем оценки уровня развития лесных дорог (в том числе оценки доступности водных объектов) с учётом синергетической связи этого показателя с классом пожарной опасности лесоучастков.

Данное оценивание необходимо для выявления потребности как в улучшении состояния существующих лесных дорог, посредством которых будет осуществляться борьба с лесными пожарами наземным способом, так и в создании этих дорог.

Представленная концептуальная постановка задачи рационального планирования лесных дорог противо-

пожарного назначения, опираясь на результаты анализа специальной литературы [4–9, 11, 13, 15–16], будет трансформирована в математическую посредством применения следующих инструментов: для формализации модели и системы её ограничений аналитический метод, так как именно он может с меньшими вычислительными затратами получить достоверный результат, применяя традиционные хорошо развитые математические методы анализа; картографический метод для вычисления фактического расстояния доставки сил и средств пожаротушения; линейное (каноническая форма линейных уравнений, поскольку имеет место соотношение показателей), так как основные показатели рассматриваемого планирования находятся в прямой зависимости друг от друга; динамическое программирование, так как критерием оптимальности решаемой задачи является временной фактор; и для определения факторов, снижающих скорость доставки спасателей и пожарных бригад к очагу горения, которые являются прогнозируемой величиной, необходимо применять стохастическое программирование.

Разработанная авторами математическая модель определяет эффективность плеча доставки сил и средств пожаротушения от ПХС до очага горения. Подобная постановка модели обуславливается тем, что именно показатель этой эффективности оценивает достаточность уровня развития сети дорог противопожарного назначения для реализации качественной наземной охраны лесов от пожаров. Расчётное значение данного показателя определяет вектор создания и развития сети лесных дорог противопожарного назначения, тем самым обеспечивается рациональность их планирования.

Критериальная направленность целевой функции в авторской модели ориентирована на достижение минимума временной продолжительности доставки спасателей и пожарных бригад от пожарного пункта до очагов лесных пожаров.

Следует отметить, что целевой функционал представляет собой отношение фактического плеча доставки сил и средств пожаротушения до отдалённых мест охраняемого объекта к предельно-допустимому (расчёtnому) плечу этой доставки. Аналитическое выражение, описывающее данную функцию, имеет вид (1):

$$\mathcal{E}\phi_{\text{пл}}(t) = \lim_{t_{\text{факт}} \rightarrow 0} \frac{l_{\text{факт}}(t)}{l_{\text{пл}}(t)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $t_{\text{факт}}(t)$ – временная продолжительность доставки спасателей и пожарных бригад от пожарного пункта до отдалённых мест охраняемого объекта по факту, в период времени t , $t \in [0, \dots, T]$, ч.; $[0, \dots, T]$ – времен-

ной период возникновения лесных пожаров; $l_{\text{факт}}(t)$ – плечо транспортировки спасателей и пожарных бригад по сети лесных дорог по факту, во временной период t (соответственно, определяется картографическим методом), км; $l_{\text{пл}}(t)$ – предельно-допустимое (расчёtnое) расстояние доставки спасателей и пожарных бригад по сети лесных дорог, во временной период t , км.

Исходя из логики постановки выражения (1), предельно-допустимое (расчёtnое) значение эффективного плеча доставки сил и средств пожаротушения по элементам лесотранспортной сети от ПХС до отдалённых мест охраняемого объекта, в интервал времени t , определяется выражением (2):

$$l_{\text{пл}}(t) = v_{\text{п}} \times \left[\frac{(t_{\text{норм}}^i \cdot (t_{\text{факт}}^i - t_{\text{норм}}^i))}{t_{\text{норм}}^i} + \frac{(t_{\text{норм}}^j \cdot (t_{\text{факт}}^j - t_{\text{норм}}^j))}{t_{\text{норм}}^j} + \frac{(t_{\text{норм}}^r \cdot (t_{\text{факт}}^r - t_{\text{норм}}^r))}{t_{\text{норм}}^r} \right] \quad (2)$$

где $t_{\text{норм}}^i$ – предельное значение времени транспортировки спасателей и пожарных бригад к очагу лесного пожара для территорий лесных земель первого класса пожароопасности, согласно нормативам, ч; $t_{\text{норм}}^j$ – предельное значение времени транспортировки спасателей и пожарных бригад к очагу лесного пожара для территорий лесных земель второго класса пожароопасности, согласно нормативам, ч; $t_{\text{норм}}^r$ – предельное значение времени транспортировки спасателей и пожарных бригад к очагу лесного пожара для территорий лесных земель с третьего по пятый класс пожароопасности, согласно нормативам, ч; $t_{\text{факт}}^i$, $t_{\text{факт}}^j$, $t_{\text{факт}}^r$ – фактическое время движения спасателей и пожарных бригад от ПХС до отдалённых мест охраняемого объекта, с учётом категории пожарной опасности территории лесного фонда, ч; i – территории лесного фонда первой категории пожарной опасности, $i \in [0, \dots, m]$; j – территории лесного фонда второй категории пожарной опасности, $j \in [0, \dots, n]$; r – территории лесных земель с третьего по пятый класс пожароопасности, $r \in [0, \dots, l]$; $v_{\text{п}}$ – скорость передвижения сил и средств пожаротушения по пересечённой местности (пешая), принимается исходя из климатических и дорожных условий, км/ч.

Временная продолжительность доставки сил и средств пожаротушения от пожарного пункта до очага лесного пожара с учётом класса пожарной опасности территории лесного фонда во временной период t , вычисляются выражением (3):

$$t_{\text{факт}} = \lim_{t_{\text{норм}}} \sum_{k=1}^K \begin{cases} \frac{l_u}{v_u \cdot \prod_{k_u=1}^K k_u} + \sum_{i=0}^m \frac{l_m^i}{v_m^i \cdot \prod_{k_{mi}=1}^K k_{mi}} + \frac{l_b^i}{v_b^i \cdot \prod_{k_{bi}=1}^K k_{bi}} + \frac{l_y^i}{v_y^i \cdot \prod_{k_{yi}=1}^K k_{yi}} + \frac{l_n^i}{v_n^i \cdot \prod_{k_{ni}=1}^K k_{ni}} \\ \frac{l_u}{v_u \cdot \prod_{k_u=1}^K k_u} + \sum_{j=0}^n \frac{l_m^j}{v_m^j \cdot \prod_{k_{mj}=1}^K k_{mj}} + \frac{l_b^j}{v_b^j \cdot \prod_{k_{bj}=1}^K k_{bj}} + \frac{l_y^j}{v_y^j \cdot \prod_{k_{yj}=1}^K k_{yj}} + \frac{l_n^j}{v_n^j \cdot \prod_{k_{nj}=1}^K k_{nj}} \rightarrow \min \\ \frac{l_u}{v_u \cdot \prod_{k_u=1}^K k_u} + \sum_{r=0}^l \frac{l_m^r}{v_m^r \cdot \prod_{k_{mr}=1}^K k_{mr}} + \frac{l_b^r}{v_b^r \cdot \prod_{k_{br}=1}^K k_{br}} + \frac{l_y^r}{v_y^r \cdot \prod_{k_{yr}=1}^K k_{yr}} + \frac{l_n^r}{v_n^r \cdot \prod_{k_{nr}=1}^K k_{nr}} \end{cases} \quad (3)$$

где l_m , l_b , l_y – плечо транспортировки спецтехники и пожарных бригад, по элементам сети лесных дорог, км; l_u – плечо транспортировки спецтехники и пожарных бригад от пожарно-химической станции до границы лесничества, км; l_p – плечо доставки сил и средств пожаротушения до очага горения по пересечённой местности (пешее) до центральной точки охраняемого объекта, км; v_m , v_b , v_y – скорости транспортировки сил и средств пожаротушения по элементам сети лесных дорог, км/ч; v_u – скорость транспортировки сил и средств пожаротушения от пожарного пункта до границы лесничества, км/ч; k – тип подвижного состава, $k \in [1, \dots, K]$; $\prod_{k=1}^K k$ – показатель представляет собой произведение факторов, определяющих естественное снижение скорости подвижного состава и пожарных бригад к очагу возникновения лесных пожаров.

Очевидно, что перечень учитываемых факторов, снижающих скорость транспортировки сил и средств пожаротушения к очагу возникновения лесного пожара, различен для разных участков лесных дорог. В этой связи авторская модель предусматривает отдельную корректировку показателей скорости по разным участкам сети лесных дорог на количественную величину влияния этих факторов (определяется экспертыным путем и согласно методике [14]).

Если по маршруту следования спецтехники и пожарных бригад отсутствуют искусственные резервуары с водой или водные объекты, то в модели необходимо учитывать расстояние и рассчитывать время движения спецтехники и пожарных бригад до этих объектов. Этот расчёт позволит произвести оптимизационные расчёты с меньшей погрешностью.

При реализации модели должны соблюдаться следующие ограничения:

1. Ограничение, определяющее невозможность отрицательности некоторых переменных по естественным причинам, таких как скорость, время и расстояние движения спецтехники и пожарных бригад.

2. Ограничение, указывающее на наличие снижения скорости передвижения спецтехники и пожарных бригад по элементам сети лесных дорог по естественным причинам. То есть значение показателя $\prod_{k=1}^K k$ должно быть больше нуля.

Литература

1. Российская Федерация. Законы. «Лесной кодекс Российской Федерации» от 04.12.2006 N 200-ФЗ (ред. от 02.07.2021) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2021) – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/ (дата обращения 07.05.2025 г.)
2. Методическими рекомендациями по применению сил и средств для тушения лесных пожаров (утв. МЧС России № 2-4-87-9-18 от 16.07.2014 г.). – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_246655/ (дата обращения 15.05.2025 г.)
3. Лесные пожары в России. Статистика и антирекорды // ТАСС-ДОСЬЕ. 29.07.2019. <https://tass.ru/info/6712527/> (дата обращения 15.05.2025 г.)
4. Тюрин Н.А., Громская Л.Я., Антонова Т.С., Зубова О.В., Силецкий В.В. Оптимизация территориального размещения лесных пожарно-химических станций // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. № 227. 2019. С. 224–235
5. Момот А.В. Проектирование противопожарных лесных дорог по критерию времени доставки сил и средств пожаротушения // Лесотехнический журнал № 1. 2016. С. 116–122.
6. Сылткян Г.В. Лесные пожары и борьба с ними на Крайнем Северо-Востоке Сибири // дис. ... д. с/х. н., М.: 2002. 314 с.
7. 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. Т. 2 (1), 2019. С. 1–28.
8. Матвеева А.А., Рулев А.С. Эколо-экономические аспекты проектирования региональной сети ПХС для регулирования пожароопасной обстановки // Вестник АПК Ставрополья. 2016 № 3 (23). С. 251–255.

3. Ограничение, указывающее на то, что значение показателя временной продолжительности доставки спецтехники и сил пожаротушения от пожарного пункта до очага возникновения лесного пожара по факту должно быть меньше либо равно нормативному значению этого показателя.

4. Ограничение, указывающее на то, что значение показателя плеча передвижения спецтехники и сил пожаротушения от пожарно-химических станций до очагов возникновения лесных пожаров по факту должно быть меньше либо равно расчётному значению этого показателя. Следовательно, что если условие, задаваемое этим ограничением, не соблюдается, то при существующей сети лесных дорог транспортировка спецтехники и пожарных бригад до очагов горения осуществляется позже времени, указанного в нормативах. Данное обстоятельство будет обуславливать потребность создания новых лесных дорог противопожарного назначения для повышения качества борьбы с лесными пожарами наземным способом.

Выводы. Предлагаемая авторами модель позволит обеспечить подход к планированию лесных противопожарных дорог на основе принципа рациональности, что будет способствовать обеспечению осуществления борьбы с лесными пожарами наземным способом вплоть до отдалённых участков лесничества. Достижение рациональности при планировании лесных дорог противопожарного назначения посредством применения авторской разработки обусловливается тем, что выработанная модель позволяет вычислить степень обеспеченности отдалённых лесоучастков нормативным временем реагирования сил пожаротушения при существующей сети лесных дорог, т. е. авторская модель дает возможность оценить уровень развития лесных дорог противопожарного назначения. На основе этой оценки определяется потребность создания дополнительных и развития существующих лесохозяйственных дорог противопожарного назначения, посредством которых будет эффективно реализовываться доставка спецтехники и пожарных бригад в отдалённые участки лесничества согласно времени, указанному в нормативах [2].

Часть материалов получена при выполнении работ по гранту Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

9. Григорьева О.И., Гринько О.И., Григорьев И.В., Калита Е.Г., Тихонов Е.А. Прогнозная модель послепожарного лесо-восстановления в Иркутской области // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13. № 1 (49). С. 85–98.
10. 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.
11. Хильченко, Н.В. Оценка эколого-экономического ущерба (методы и практика): Препринт /Н.В. Хильченко, Е.В. Потапова и др. – Екатеринбург : УрО РАН Институт экономики, 2004. 67 с.
12. Ковалев Р.Н., Еналеева-Бандура И.М., Никончук А.В. Оценка влияния пожаров на лесные экосистемы с учётом уровня развития лесотранспортной сети // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 131–149.
13. Коршунов Н.А., Савченкова В.А., Пронин К.Н. Оценка минимальных требований по техническому оснащению лесопожарных групп // Вестник Красноярского государственного университета. 2017 Вып. 9. С. 63–69.
14. 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. № 2. 2014. С. 37–39.
15. 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.
16. 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.
17. Куницкая О.А. Моделирование различных способов пропитки древесины полимерами // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. 2011. № 3. С. 131–135.
18. Куницкая О.А., Бурмистрова С.С., Хитров Е.Г., Минаев А.Н. Математическое моделирование процесса пропитки древесины в пьезопериодическом поле // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2018. № 5 (365). С. 168–180.
19. 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.
20. Злобина Н.И., Зеликов В.А., Григорьева О.И., Новгородов Д.В. Обоснование пропускной способности по критерию безопасности дорожного движения на лесовозных автомобильных дорогах // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 4. С. 19–35.
21. 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.
22. Зорин М.В., Куницкая О.А. Типы современных пластиковых плит для строительства временных лесных дорог и технологических коридоров // Деревянное домостроение Севера: традиции и инновации. Сборник статей по материалам всероссийской научно-практической конференции. Петрозаводск, 2023. С. 28–30.
23. Куницкая О.А., Рудов С.Е., Зорин М.В. Перспективы использования пластиковых плит строительства временных транспортных путей // Машиностроение: новые концепции и технологии. Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск, 2020. С. 98–103.
24. Зорин М.В., Хитров Е.Г., Куницкая О.А., Елисеев П.С., Юдилевич А.М., Клубничкин В.Е. Конечно-разностная схема для расчета прогиба дорожного мата под воздействием движителя лесной машины // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2025. Т. 29. № 1. С. 96–111.

References

1. The Russian Federation. Laws. "Forest Code of the Russian Federation" dated 04.12.2006 N 200-FZ (as amended on 02.07.2021) (with amendments and additions, intro. effective from 09/01/2021) – Access mode: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299 / (date of application 05/07/2025)
2. 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 dated 07/16/2014).- Access mode: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_246655 / (accessed 05/15/2025)
3. Forest fires in Russia. Statistics and anti-bullying // TASS-DOSSIER. 07/29/2019. <https://tass.ru/info/6712527> / (accessed 05/15/2025)
4. Tyurin N.A., Gromskaya L.Ya., Antonova T.S., Zubova O.V., Siletsky V.V. Optimization of the territorial location of forest fire and chemical stations // Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy. No. 227. 2019. pp. 224–235.
5. Momot A.V. Design of fire-fighting forest roads according to the criterion of time of delivery of fire extinguishing forces and means. // Forestry Engineering Journal No. 1. 2016. pp.116–122.
6. Snytkin G.V. Forest fires and their control in the Far North-East of Siberia // dis... doctor of agricultural sciences, Moscow : 2002. 314 p.
7. Podolskaya E.S., Kovganko K.A., Yershov D.V., Shulyak P.P., Suchkov A.I. Using a model of the regional transport network to estimate the time and distance of ground delivery of forces and equipment to forest fires. Voprosy lesnoy nauki. Т 2 (1), 2019. pp. 1–28.
8. Matveeva A.A., Rulev A.S. Ecological and economic aspects of designing a regional PHS network for regulating a fire-hazardous situation // Bulletin of the Agroindustrial Complex of Stavropol. 2016 No. 3 (23). pp. 251–255.
9. Grigoreva O.I., Grinko O.I., Grigorev I.V., Kalita E.G., Tikhonov E.A. Predictive model of post-fire reforestation in the Irkutsk region // Forestry engineering magazine. 2023. Vol. 13. No. 1 (49). pp. 85–98.
10. Kovalev R.N., Baranov A.N., Ivanov V.A., Zhang S.A. An integral mathematical model for assessing the ecological and economic damage to forest ecosystems from fires, taking into account the level of development of the transport network // Systems and Methods of Technology. 2020. No. 4 (48). pp. 156–161.
11. Khilchenko, N.V. Assessment of ecological and economic damage (methods and practice): Preprint /N.V. Khilchenko, E.V. Potapova et al. Yekaterinburg: Ural Branch of RAS Institute of Economics, 2004. 67 p.
12. 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 transportation network. Izv. vuzov. Lesn. zhurnal. 2021. No. 4. pp. 131–149.
13. Korshunov N.A., Savchenkova V.A., Provin K.N. Assessment of minimum requirements for technical equipment of forest

- fire fighting groups // Bulletin of the Krasnoyarsk State University. 2017 Issue 9. pp. 63–69.
14. Leonovich I.I., Vyrko N.P., Demidko M.N. The influence of the condition of transport routes on the efficiency of logging road trains in the transportation of harvested forest // Proceedings of BSTU. Forestry and woodworking industry. No. 2. 2014. pp. 37–39.
15. Gromov I.A., Tyurin N.A. A model for optimizing the structure of a forest transport network, taking into account the fire protection function of forest roads // Collection of articles based on the materials of the scientific and technical conference of the Institute of Technological Machines and Forest Transport based on the results of scientific research in 2018. St. Petersburg: St. Petersburg State Technical University, 2019 pp. 125–129.
16. North M.P., Stephens S.L., Collins B.M., Agee J.K., Franklin J.F. Environmental Science // Reform for-est fire management. Insights. USA. 2015. Pp. 1280–1281.
17. Kunitskaya O.A. Modeling of various methods of wood impregnation with polymers // Bulletin of the Moscow State University of Forests. Lesnoy Vestnik. 2011. No. 3. pp. 131–135.
18. Kunitskaya O.A., Burnistrova S.S., Khitrov E.G., Minaev A.N. Mathematical modeling of the wood impregnation process in a piezoelectric field // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Forest magazine. 2018. No. 5 (365). pp. 168–180.
19. Zlobina N.I., Zelikov V.A., Zorin M.V., Grigoreva O.I., Guryev A.Yu. Justification of the economic effectiveness of road safety on logging trucks // Occupational safety and health in logging and woodworking industries. 2023. No. 1. pp. 44–51.
20. Zlobina N.I., Zelikov V.A., Grigoreva O.I., Novgorodov D.V. Substantiation of throughput capacity according to the criterion of road safety on logging trucks // Occupational safety and health in logging and woodworking industries. 2022. No. 4. pp. 19–35.
21. Zlobina N.I., Zelikov V.A., Grigoreva O.I., Guryev A.Yu. Review of road safety on logging trucks // Occupational safety and health in logging and woodworking industries. 2022. No. 4. pp. 4–18.
22. Zorin M.V., Kunitskaya O.A. Types of modern plastic plates for the construction of temporary forest roads and technological corridors // Wooden house construction in the North: traditions and innovations. Collection of articles based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference. Petrozavodsk, 2023. pp. 28–30.
23. Kunitskaya O.A., Rudov S.E., Zorin M.V. Prospects of using plastic plates for the construction of temporary transport routes // Machine building: new concepts and technologies. All-Russian Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists. Krasnoyarsk, 2020. pp. 98–103.
24. Zorin M.V., Khitrov E.G., Kunitskaya O.A., Eliseev P.S., Yudilevich A.M., Klubnichkin V.E. Finite difference scheme for calculating the deflection of a road mat under the influence of a forest vehicle propulsor. Lesnoy Vestnik. Forestry Bulletin. 2025. Vol. 29. No. 1. pp. 96–111.