

УДК 625.711.84:630.431:630.181.43

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-131-149

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОЖАРОВ НА ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ С УЧЕТОМ УРОВНЯ РАЗВИТИЯ ЛЕСОТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

Р.Н. Ковалев¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [B-3695-2017](https://orcid.org/0000-0001-8928-8765),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8928-8765>

И.М. Еналеева-Бандура², канд. техн. наук, науч. сотр.;

ResearcherID: [AAK-5364-2021](https://orcid.org/0000-0001-7032-9512), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>

А.В. Никончук², канд. техн. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [AAI-9139-2021](https://orcid.org/0000-0002-9159-7978),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9159-7978>

¹Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail: kir9624@yandex.ru

²Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; e-mail: melnikov1978@inbox.ru, n_alex_krsk@mail.ru

Аннотация. В настоящее время отсутствует единое научное понимание определения величины общего эколого-экономического ущерба от лесных пожаров на основе экосистемного подхода, учитывающего многостороннее назначение лесных благ и зависимость достижения эффективности лесохозяйственных и противопожарных мероприятий от уровня развития транспортной сети на территории лесного фонда. Цель статьи – разработка методики оценки величины эколого-экономического ущерба от пожаров лесным экосистемам с учетом фактора планирования лесной дорожной сети и ее апробация. Исследованы вопросы, касающиеся необходимости прогнозирования вероятности возникновения лесных пожаров, площади их распространения по территории лесного фонда, оценки возможного эколого-экономического ущерба лесным экосистемам. Изучение данных вопросов необходимо для своевременного проведения противопожарных и лесовосстановительных мероприятий, а также для определения величины оптимальных резервов, достаточных для ликвидации последствий лесных пожаров, оценки сопряженности показателя общего эколого-экономического ущерба от пожаров лесным экосистемам с непосредственно влияющим на этот показатель уровнем развития транспортной сети. Приведена разработанная авторами математическая модель, положенная в основу предлагаемого метода оценки величины эколого-экономического ущерба от пожаров лесным экосистемам с учетом фактора планирования создания и развития лесной дорожной сети. Разработка базируется на инструментарии экономико-математического моделирования, элементах теории вероятности и комбинаторики, а также комплексном междисциплинарном подходе к объекту исследования. Также описаны результаты расчетно-численного эксперимента при помощи разработанного методологического аппарата. Предложенная авторами методика может быть использована при выявлении наиболее пожароопасных территорий лесного фонда, разработке мероприятий по сохранению биоразнообразия, планировании рубок, лесовосстановительных работ и др.

Для цитирования: Ковалев Р.Н., Еналеева-Бандура И.М., Никончук А.В. Оценка влияния пожаров на лесные экосистемы с учетом уровня развития лесотранспортной сети // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 131–149. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-131-149

Ключевые слова: лесные пожары, земли лесного фонда, эколого-экономический ущерб, лесная дорожная сеть.

Введение

Пожары – один из наиболее мощных экологических факторов – оказывают многогранное влияние на лесные биогеоценозы, уничтожая органический слой почвы, вызывая ее сильную эрозию и загрязняя атмосферу продуктами горения. Тушение лесных пожаров необходимо, но высокочрезвычайно, что обусловлено прежде всего отсутствием на территориях лесного фонда страны достаточно развитой транспортной системы лесного фонда (ТСЛФ). ТСЛФ является неотъемлемым компонентом современной лесной экосистемы [25] и способствовала бы не только тушению пожаров и выполнению работ по восстановлению древостоев с наименьшими затратами, но и обеспечивала бы проведение всего комплекса противопожарных мероприятий. Возникает экономическая дилемма. С одной стороны, задача формирования новой ТСЛФ в целом и ее дорожной сети в частности требует значительных финансово-материальных ресурсов, с другой – высокие денежные затраты на тушение лесных пожаров обусловлены прежде всего отсутствием развитой транспортной сети на территории лесного фонда. Критерием принятия решения в пользу проекта ТСЛФ является снижение эколого-экономического ущерба лесным биогеоценозам посредством планирования, создания и развития на территориях лесного фонда эффективных дорожных систем. Их наличие способствует повышению уровня лесопользования и лесовосстановления в послепожарный период, своевременному тушению возникающих очагов и проведению всего комплекса противопожарных мероприятий. Кроме того, согласно [3], при наличии дорожной сети сокращается средняя площадь распространения лесных пожаров, а следовательно, и размер ущерба от их воздействия. Таким образом, перечисленные положительные факторы влияния наличия современных ТСЛФ обуславливают окупаемость ее проекта посредством снижения величины обозначенного ущерба, который можно отнести к потерям в лесном хозяйстве от бездорожья.

Объекты и методы исследования

С позиций хозяйствующих субъектов эколого-экономический ущерб, наносимый лесными пожарами, можно обозначить как сумму затрат на охрану лесов, тушение пожаров и величины снижения стоимости выгоревшего участка леса (лесопокровной территории). Данная сумма, как правило, определяется натуральными показателями и их экономическими оценками, изменяющимися согласно пространственно-временной динамике восстановления территорий лесного фонда после пожара. По данным источника [13], размер ущерба от лесных пожаров в Российской Федерации за последние 6 лет (по годам) составил: более 40 млрд руб. – в 2020–2019 гг.; 16,9 млрд руб. – в 2018 г.; 25,2 млрд руб. – в 2017 г.; более 23 млрд руб. – в 2016 г. и 56,4 млрд руб. – в 2015 г. От 3 до 7 млрд в каждом из указанных значений занимает ущерб лесному хозяйству (потери древесины) – обесценивание свыше 200 млн м³ древесины. Лесные пожары повреждают или уничтожают ценную деловую породу и пагубно влияют на возобновление ее ресурсов, что в среднем составляет 18 % от общего ущерба. Остальные потери – расходы на тушение и последующую расчистку горелых площадей, ущерб от гибели животных, загрязнения продуктами горения, затраты на восстановление леса и т. д. составляют 82 % от величины общего ущерба. Следует отметить, что, согласно [21], затраты на обустройство, строительство и уход за проти-

вопожарными объектами (дороги, канавы, полосы) составляют около 15 % от общих затрат. С учетом этих данных очевидно, что разработка мероприятий по снижению величины ущерба лесным территориям от пожаров является актуальной научной задачей.

При этом большое значение имеет прогнозирование вероятности возникновения пожаров и их возможного распространения на площадях лесного фонда в целях своевременного проведения противопожарных мероприятий. Прогнозная величина обозначенного ущерба также является важным эколого-экономическим показателем, поскольку она позволит заранее сформировать в бюджете необходимый фонд на покрытие затрат, связанных с тушением лесных пожаров, которые не удастся предотвратить в будущих пожароопасных периодах хозяйствования. Таким образом, очевидна необходимость разработки метода оценки величины данного ущерба с учетом фактора наличия и планирования развития ТСЛФ на основе принципов экосистемного подхода.

Вопросам прогнозирования возникновения лесных пожаров и ущерба окружающей среде от их воздействия посвящено много научных исследований [4, 5, 8–11, 14–23, 28–33]. В качестве критериальных значений эколого-экономической оценки урона, наносимого территориям лесного фонда пожарами, в научной литературе [5, 7, 8–10, 16, 18, 21–23] используются показатели, базирующиеся на величине затрат на охрану лесов и тушение возгораний, на снижении стоимости (в том числе и кадастровой) пройденных огнем лесных площадей.

При разработке методов оценки эколого-экономического ущерба лесным экосистемам рекомендуют [5, 6–10, 21–23, 26] учитывать сокращение объемов древесного сырья, изменение средоформирующих и социальных функций лесов. Так, например, предлагается [21] величину потенциального ущерба формировать в соответствии с динамикой лесных территорий. Ее следует рассматривать как пространственно-временную трансформацию в лесной экосистеме посредством изменения биометрических параметров, интенсивности физиологических, биохимических и биофизических процессов. Очевидно, что критерии оценки ущерба должны учитывать такие особенности, наиболее важной из которых является временной фактор. Данная составляющая при эколого-экономической оценке ущерба лесным экосистемам состоит в приведении к сопоставимому виду их настоящих и будущих показателей в денежном эквиваленте [11], что выражается преимущественно в необходимости объективного сравнения затрат настоящего момента (в т. ч. затрат на тушение пожаров и лесовосстановление) и изменения будущих эффектов лесных территорий в связи с последствиями от прохождения огня.

В научной литературе отсутствуют исследования по теме улучшения продуктивности лесопользования посредством создания и повышения уровня развития ТСЛФ, которая позволит провести весь комплекс лесохозяйственных мероприятий после лесных пожаров, а также противопожарных мероприятий. Кроме того, остаются открытыми вопросы: насколько при наличии достаточно развитой транспортной сети уменьшится эколого-экономический ущерб, причиненный пожаром лесным экосистемам; появится ли возможность более точно прогнозировать ущерб и ускорить процесс лесовосстановления. Таким образом, возникает необходимость дальнейшей проработки поставленной оптимизационной задачи.

Авторами предложен теоретический аппарат с однозначным описанием всех зависимостей, входящих в математическую модель определения прогнозной величины эколого-экономического ущерба от лесных пожаров с учетом фактора планирования ТСЛФ. В целях обоснования эффективности метода произведены экспериментальные расчеты. В качестве пилотной территории принято Енисейское лесничество Красноярского края, для наглядности разделенное на участковые лесничества. В табл. 1 приведены кварталы, в которых за исследуемый нами период имелись возгорания (использовались данные за 3 года, поскольку выполнение расчета для большего временного промежутка достаточно трудоемко при отсутствии программного обеспечения, разрабатываемого на данный момент авторами), а также площади лесных территорий, пройденные пожарами.

Таблица 1

Исходные данные для расчета прогнозной величины эколого-экономического ущерба от лесных пожаров за 3 года

Участковое лесничество	Квартал участкового лесничества с зафиксированными очагами возгорания			Пройденная огнем территория лесного фонда на момент ликвидации пожара, га					
				Покрытая лесом			Не покрытая лесом		
	2018	2019	2020	2018	2019	2020	2018	2019	2020
Озерновское	53, 48, 85, 8, 45, 16, 42, 11, 88, 18, 43, 17, 47, 16, 10	5, 9, 21, 11, 50, 36, 54, 19, 41, 23, 13, 71, 31, 2, 18, 37	45, 30	371,6	587,0	54	264	64	0
Чалбышевское	4, 9, 13, 9, 65, 26, 118, 9, 129	19, 7, 53, 36, 51, 43	25, 39, 6	759,0	217,2	7,5	716	90	8
Назимовское	868, 793, 387, 760, 388, 792, 565, 1152, 761, 1151, 1100, 562, 1153	1100	1095, 411, 651	3612,0	0,6	33	210	0	0
Маклаковское	117, 25, 65, 83, 52, 3, 44	116, 116, 2, 44	44, 44, 104	230,8	328,0	58	36	16	0
Лосиноборское	279, 306, 231, 232	669, 268, 348, 305, 348, 744	430	1304,0	220,0	190	6	54	0
Рудиковское	160, 78	–	–	11,0	–	–	0	–	–
Усть-Питское	279, 196, 20	–	300	267,0	–	3	0	–	0
Каргинское	90, 8, 96	25	115	12,0	110,0	75	0	70	0
Енисейское	340, 498	1267, 1719	–	1,3	86,0	–	0	0	–
Епишинское	123, 62	171	–	24,0	168,0	–	0	12	–

При расчете суммарного ущерба по видам лесопользования, а также затрат на тушение лесных пожаров и строительство транспортной сети были использованы, кроме того, приведенные в табл. 2 показатели за отчетный временной интервал.

Таблица 2

Дополнительные исходные данные для расчета прогнозной величины эколого-экономического ущерба от лесных пожаров

Планирование транспортной сети, руб./км	Средняя скорость распространения огня, км/ч v	Коэффициент временной коррекции восстановления K_t^i	Коэффициент дисконтирования финансовых потоков e	Временной интервал вероятностного возникновения k -х пожаров ($t; \tau$)	Удельная оценочная стоимость функции поглощения CO_2 , руб./га в год, C^b	Коэффициент оборота рубки $K_p^{\text{об}}$
1 500 000	7	1	0,068	30.04.21; 20.10.21	1758	8,64

В качестве исходных данных для составления прогнозной оценки величины эколого-экономического ущерба, нанесенного древостоям огнем, выступали карты лесных пожаров по кварталам участковых лесничеств за 2018–2020 гг. (на рис. 1–3 отмечены очаги возгорания [12]) и таксационные данные [14].

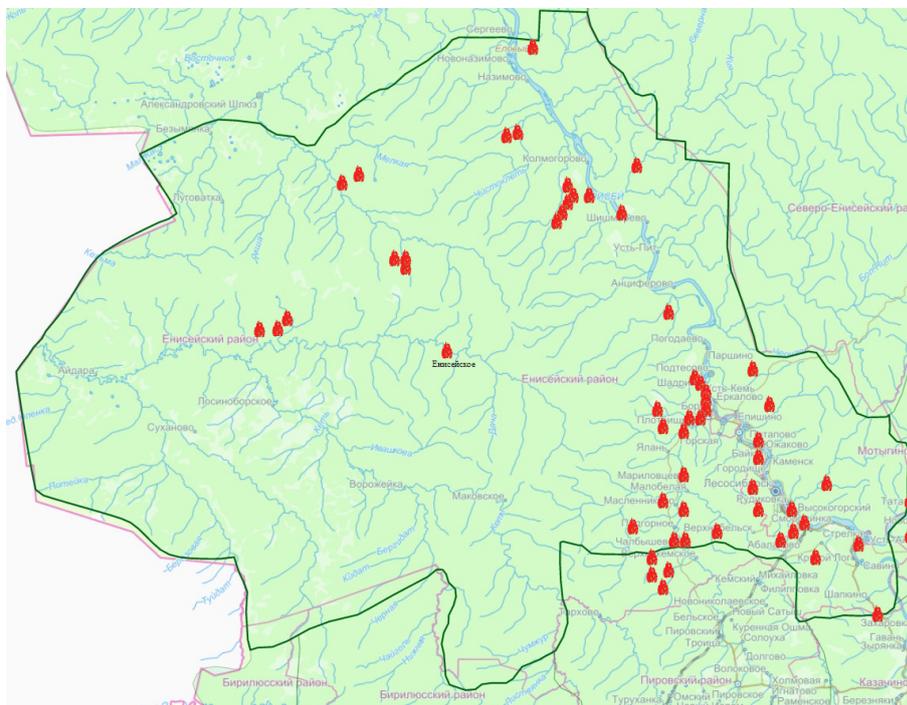


Рис. 1. Карта пожаров в Енисейском лесничестве за 2018 г.

Fig. 1. Map of fires in the Yenisey forestry for 2018

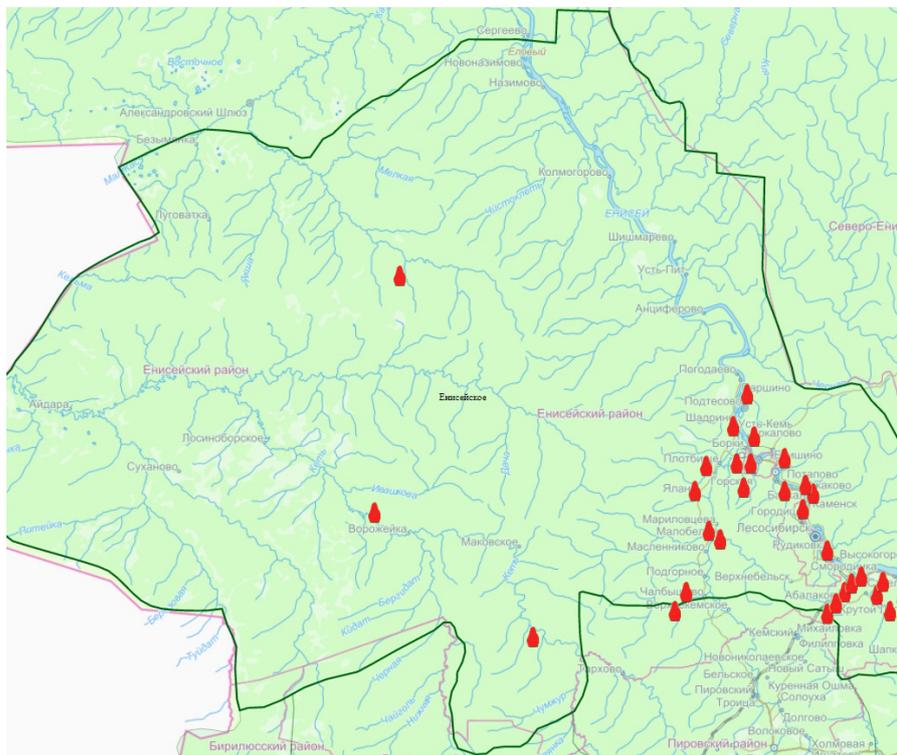


Рис. 2. Карта пожаров в Енисейском лесничестве за 2019 г.

Fig. 2. Map of fires in the Yenisey forestry for 2019

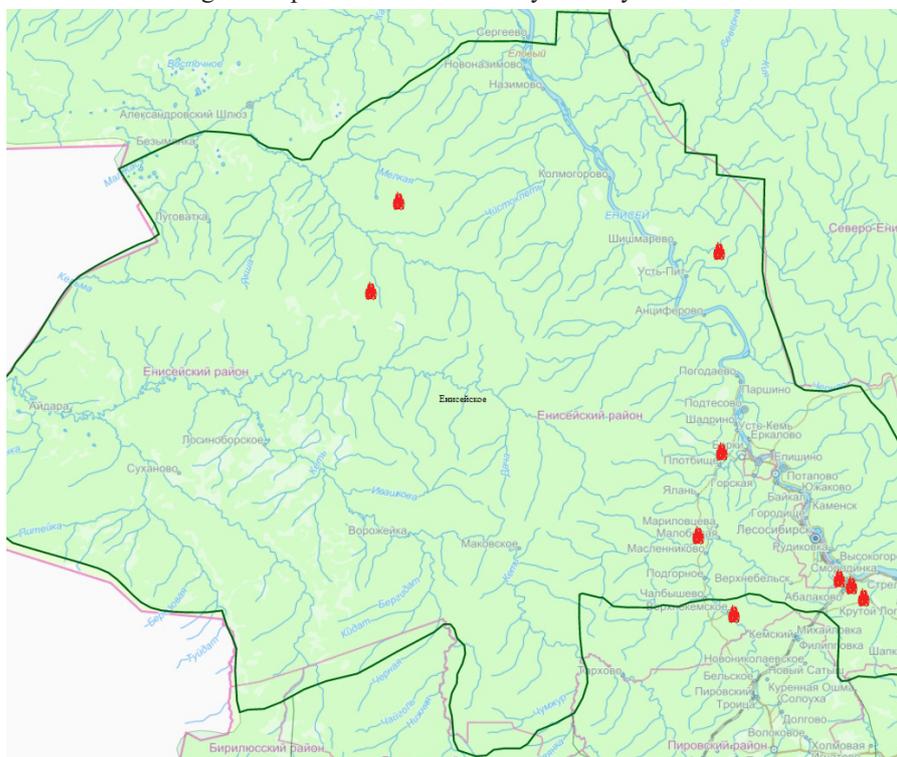


Рис. 3. Карта пожаров в Енисейском лесничестве за 2020 г.

Fig. 3. Map of fires in the Yenisey forestry for 2020

Также в качестве исходных данных использованы сведения из источников [10, 18, 27, 30] о: годовой ставке лесных податей, взимаемых за подсочку 1 га насаждений; возможном ущербе из-за снижения почвозащитных, санитарно-гигиенических, водоохраных и других средообразующих функций леса; коэффициенте поглощения CO_2 лесами j -породы i -го га и др.

Посредством анализа статистических данных о лесных пожарах в Енисейском лесничестве за последние 3 года (2018–2020 гг.) были определены в процентном соотношении причины возгораний, из которых пожары из-за гроз составили 31,5 %, по вине населения – 47,5 %, от линейных объектов (линии электропередачи, авто- и железных дорог, трубопроводов) – 4 %, остальные 17 % пожаров перешли с земель иных категорий.

В июле 2020 г. в Назимовском и Лосиноборском участковых лесничествах по естественным причинам возникло 3 крупных пожара, которые не были своевременно ликвидированы, из-за чего пострадало 4230 га покрытых лесом территорий, т. е. 48 % от общего числа земель, пострадавших от огня за 3 года. Данное обстоятельство обусловлено отсутствием транспортной сети (при прогнозировании данные значения учтены как величины случайного характера). Назимовское и Лосиноборское участковые лесничества находятся на северо-западе Енисейского лесничества и имеют наименьшую транспортную доступность и наибольшую площадь сгоревших территорий среди всего Енисейского лесничества, достигающую 5359 га за 3 года, что составляет 61 % от общего числа пройденных пожарами лесных территорий. В особенности это касается Лосиноборского лесничества, где около 100 % возгораний объясняется природным фактором.

Наибольшая доля лесных пожаров приходится на Озерновское лесничество – 29 %, схожая ситуация в Чалбышевском – 22 % и Малакавском – 13 % лесничествах. Основная причина возгораний – антропогенный фактор: недалеко расположена река и крупный населенный пункт (г. Лесосибирск), есть достаточно развитая дорожная сеть. Тем не менее, благодаря той же сети, лесные пожары в Озерновском лесничестве редко разрастаются до 2 га и более и могут быть быстро ликвидированы [12].

Вблизи Енисейского (4 %), Каргинского (3%), Епишинского (2 %) и Рудиковского (2%) лесничеств также расположены села и деревни – все пожары возникали по вине населения [12].

Усть-Питское участковое лесничество относится к отдельной группе. Оно находится поодаль от крупных населенных пунктов и при этом имеет относительно плотную дорожную сеть на небольшом участке. За 3 года на данной территории возникло 4 пожара, два из которых – по вине человека – не превысили порог в 2 га, у двух пожаров (причина – гроза) диапазон составил 100 га. Оставшиеся 3 участковых лесничества имеют наибольшее число возгораний от гроз (91 %), а также область распространения пожаров, достигающую 100 га и более [12].

В статье описаны результаты проведенного авторами исследования, а именно разработка названного методологического аппарата.

Результаты исследования и их обсуждение

В предложенном методе оценки величины эколого-экономического ущерба лесным экосистемам в соответствии с принципами экосистемного подхода учитываются в динамике факторы сокращения объема лесных ресурсов и изменения средоформирующих и социальных функций леса в послепожарный период. Данный метод позволяет принять во внимание фактор планирования ТСЛФ, поскольку наличие достаточно развитой ТСЛФ дает возможность качественного проведения комплекса лесовосстановительных работ, посредством которых выращивается высокопродуктивная и высококачественная древесина на площадях, пройденных огнем. Прогнозируемый эколого-экономический ущерб (ресурсному потенциалу лесов, средоформирующим и социальным функциям) с учетом пространственно-временной динамики в лесных экосистемах определяется выражением

$$\begin{cases} Y_{\text{сум}}^{\text{общ}} = Y_{\text{ед}}^{\text{общ}} S_k^{\text{пп}}; \\ Y_{\text{ед}}^{\text{общ}} = Z_T + \sum_{t=0}^T Z_{\text{стр}} \sum_{l=0}^L (Z_l^a + P^c + Y^c) K_l^t \rightarrow \min, \end{cases}$$

где $Y_{\text{ед}}^{\text{общ}}$ – прогнозная удельная величина эколого-экономического ущерба лесным экосистемам на 1 га лесных земель, руб./га; $S_k^{\text{пп}}$ – прогнозная суммарная площадь распространения k -х пожаров на участках лесного фонда с l -м лесным ресурсом, $l \in [1, \dots, L]$, га; Z_T – прогнозируемые удельные затраты на тушение k -х пожаров на 1 га лесных земель, $k \in [0, \dots, K]$ (в приведенной методологической разработке величины задаются определенным интервалом, например показатель L – это конечное значение по сумме лесных ресурсов, т. е. сколько их всего пострадало в отчетном периоде. Таким образом задается сумма, означающая, что расчеты будут производиться по каждому лесному ресурсу от 1-го до L (m , n или K) руб./га); $Z_{\text{стр}}$ – суммарные удельные затраты на планирование ТСЛФ по периодам времени t с учетом необходимости планирования дополнительной дорожной сети, руб./га; Z_l^a – прогнозируемые удельные затраты на восстановление l -го лесного ресурса на 1 га лесных земель, руб./га; P^c – прогнозируемые суммарные удельные потери валовой выручки по видам лесопользования за весь период восстановления территории лесного фонда на 1 га лесных земель, руб./га; Y^c – прогнозируемый суммарный удельный ущерб (прямой и косвенный) от повреждения ресурсов по видам лесопользования за весь период восстановления территории лесного фонда на 1 га лесных земель, руб./га; K_l^t – коэффициент временной коррекции восстановления l -го лесного ресурса (поправка на географическое положение, климатические условия и т. п.); ввод в модель данного коэффициента обусловлен тем, что восстановление леса во многом зависит от климата. Так, на севере сосне или лиственнице, чтобы вырасти во взрослое дерево, потребуется около 100 лет, а на юге – около 60–70 лет [15, 24].

Прогнозируемые суммарные затраты на тушение лесных пожаров включают в себя следующее: расходы на заработную плату (с начислениями) и питание рабочих лесхоза, сотрудников других организаций и предприятий, иных категорий работников; содержание баз авиационной охраны лесов; стоимость

услуг машин, тракторов, других механизмов, в том числе собственных, рассчитанная исходя из отработанных смен; цену средств пожаротушения и других грузов; почтово-телеграфные и прочие расходы, предусмотренные действующим законодательством. Прогнозируемые суммарные затраты на лесовосстановление после пожаров: расходы на расчистку горельников и приведение их в состояние, пригодное для лесного хозяйства и лесопользования, а также на дополнительные санитарные рубки (сплошные и выборочные) в насаждениях, пройденных огнем и т. п. Прогнозируемые суммарные потери валовой выручки по видам лесопользования за весь период восстановления территории лесного фонда определяются следующим выражением:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Pi_c = \frac{\sum_{t=0}^T (\Pi_g(t) + \Pi_{\text{под}}(t) + \Pi_{\text{поб}}(t) + \Pi_{\text{пф}}(t))}{(1+e)^T}; \\ \Pi_g(t) = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^K [C_{ij}^c(t) Q_{ij}^c(t) + C_{ij}^m(t) Q_{ij}^m(t)]; \\ \Pi_{\text{под}}(t) = C^{\text{год}} K_{\text{р}}^{\text{об}}; \\ \Pi_{\text{поб}}(t) = 100 C_{\text{в}}^{\text{год}}; \\ \Pi_{\text{пф}}(t) = \sum_{t=0}^T (Q_{ij}^3(t) K_{ij}^{\text{пог}}(t)) C_{\text{в}}; \\ T = \sum_{t=0}^T t. \end{array} \right.$$

где Π_g – возможные удельные потери валовой выручки посредством отпуска древесины на корню (второстепенных лесных ресурсов) на 1 га лесных земель, руб./га, на момент времени t ; $\Pi_{\text{под}}$ – возможные удельные потери валовой выручки от подсочки на 1 га леса, руб./га; $\Pi_{\text{поб}}$ – прогнозные удельные потери валовой выручки от побочного лесопользования: туризма, охоты, спорта и других целей – принимается согласно [15] равным стократной величине годового размера лесных податей, взимаемых за соответствующий вид лесопользования на оцениваемом участке лесных земель, руб./га; $\Pi_{\text{пф}}$ – возможные удельные потери валовой выручки от продуцирования углерододепонирующей функции лесов на 1 га леса, руб./га; C_{ij}^c – стоимость на момент составления прогноза удельных потерь древесины на корню в средневозрастных, приспевающих, спелых и перестойных насаждениях, руб./га; C_{ij}^m – прогнозируемый удельный ущерб от повреждения молодняков естественного и искусственного происхождения, руб./га; $C^{\text{год}}$ – годовая ставка лесных податей, взимаемых за подсочку 1 га насаждений; $K_{\text{р}}^{\text{об}}$ – коэффициент оборота рубки, изменяется от 16,39 до 4,59 при обороте рубки от 50 до 120 лет соответственно; $C_{\text{в}}^{\text{год}}$ – годовой размер лесных податей, взимаемый за соответствующий вид лесопользования [4]; Q_{ij}^3 – удельный объем потерянных (согласно прогнозируемой площади распространения k -х пожаров) запасов лесов j -породы на i -м гектаре $i \in [1, \dots, m]$, $j \in [1, \dots, n]$, м³/га; $K_{ij}^{\text{пог}}$ – коэффициент поглощения CO₂ лесами j -породы на i -м га [27]; $C_{\text{в}}$ – удельная оценочная стоимость функции поглощения CO₂ на момент времени t , руб./га; T – период прогнозного восстановления территории лесного фонда, лет; t – время прогнозного восстановления j -породы на i -ом гектаре, $t \in [0, \dots, T]$, лет.

Следует отметить, что оценка возможной потери древесины и насаждений производится по действующим в момент составления прогноза ставкам лесных податей за древесину, т. е. с учетом реальной потребительской стоимости этого товара.

Прогнозный суммарный ущерб (согласно прогнозируемой площади распространения k -х пожаров) по его видам за весь период восстановления территории лесного фонда определяется следующим выражением:

$$y_c = \sum \frac{Y_3 + Y_B + Y_\Gamma + Y_\Psi + Y_{O\Gamma}}{(1+e)^t} \left(1 + \frac{1}{(1+e)^T} \right) \rightarrow \min,$$

где Y_3 – возможный ущерб от снижения почвозащитных, санитарно-гигиенических, водоохраных и других средообразующих функций леса, руб./га; Y_B – возможный ущерб от загрязнения воздушной среды продуктами горения; пока не разработаны нормативы объемов сгорания органических веществ при лесных пожарах, принимается равным 10 % от суммарного ущерба, причиняемого огнем, в виде стоимости потерь древесины на корню и ущерба от повреждения молодняков, руб./га; Y_Γ – прогнозный ущерб от гибели животных и растений, включая виды, занесенные в Красную книгу; пока нет нормативов, принимается за 5 % от ущерба (однако на сегодняшний день Минприроды России повысило в 400 раз совокупную стоимость российской флоры и фауны [1]), выражается стоимостью потерь древесины на корню и ущербом от повреждения молодняков искусственного и естественного происхождения, руб./га; Y_Ψ – прогнозный удельный ущерб от повреждения ресурсов побочного лесопользования, руб./га; $Y_{O\Gamma}$ – стоимость сгоревших объектов и готовой продукции в лесу на момент составления прогноза (снижение стоимости объектов и готовой продукции, поврежденных пожаром), включает: возможный ущерб от возникновения лесных пожаров, повреждения или уничтожения зданий, сооружений, другого имущества лесхоза, находящегося в лесу, и ущерб от возникновения лесных пожаров, повреждения или уничтожения заготовленной лесной продукции, который определяется исходя из рыночной цены и объема уничтоженной продукции или процента снижения ее товарной ценности, руб./га.

Прогнозная суммарная площадь распространения k -х пожаров (S_k^{np}) на участках лесного фонда определяется как математическое ожидание возникновения лесного пожара согласно выражению

$$\left\{ \begin{array}{l} S_k^{np} = M[k]; \\ M[k] = \sum_{t=0}^T \sum_{k=0}^m R_k P_k; \\ P_k = \frac{[P(A)P(A_w / A) + P(E)P(E_w / E) - P(A)P(E)P(A_w E_w / A, E)]}{P(LH / H)}; \\ R_k = \int_{t_B}^{t_T} (\nu \prod_{g=1}^b g_b) dt; \\ \sum_{k=0}^m [t_B; t_T] \in (t; \tau), \end{array} \right. \quad (1)$$

где $M[k]$ – математическое ожидание возникновения k -х пожаров, га; R_k – вероятность возникновения k -го пожара; P_k – прогнозируемая интенсивность распространения k -го пожара по территории лесного фонда, га; $P(A)$ – вероятность посещения человеком территории лесного фонда. $P(A_w/A)$ – вероятность наличия источников огня при условии, что лесная территория посещается людьми; $P(E)$ – вероятность грозы; $P(E_w)$ – вероятность естественного возгорания при условии, что идет гроза; $P(A_w, E_w/A, E)$ – вероятность совместного действия антропогенного и естественного источника огня при условии, что территория лесного фонда посещается людьми и это же время идет гроза; $(t; \tau)$ – временной интервал вероятностного возникновения k -х пожаров; t_b, t_t – момент времени вероятностного возникновения и вероятностного тушения k -го пожара соответственно; v – прогнозируемая скорость распространения k -го пожара; $\prod_{g=1}^b g_b$ – рассматривается нами как произведение влияния различных факторов на интенсивность распространения k -го пожара по территории лесного фонда, таких как природно-климатические и географические условия, возможные временные потери при тушении k -го пожара и т. д., $g \in (1, \dots, b)$.

При реализации предложенной нами математической модели метода оценки величины эколого-экономического ущерба лесным экосистемам с учетом фактора планирования ТСЛФ нужно принимать во внимание следующие ограничения:

1) окупаемость проекта планирования ТСЛФ:

$$Y_6^{\text{общ}} > Y_{\text{сум}}^{\text{общ}},$$

где $Y_6^{\text{общ}}$ – прогнозируемый совокупный эколого-экономический ущерб лесным экосистемам без учета строительства и эксплуатации ТСЛФ, руб.;

2) финансовая устойчивость предприятия, инвестирующего в проект планирования ТСЛФ:

$$\sum_{t=0}^T Z_{\text{стр}}^{\text{общ}} \leq P_{\text{max}},$$

где $\sum_{t=0}^T Z_{\text{стр}}^{\text{общ}}$ – совокупные затраты на планирование транспортной сети на территории лесного фонда за период времени T , руб.; P_{max} – финансовые возможности предприятия, руб.;

3) транспортная доступность лесных площадей с высокой вероятностью возникновения пожара.

Согласно [4], эффективное плечо доставки рабочих бригад и спецтехники до i -го лесного участка от j -го пункта отправления не должно превышать доступное с экономической точки зрения расстояние доставки:

$$L_{ij} \leq L_{\text{дост}},$$

где L_{ij} – расстояние между i -м лесным участком и j -м пунктом отправления рабочих бригад и спецтехники, км.

Предлагаемая модель в динамической постановке обеспечивает корректное прогнозирование величины эколого-экономического ущерба лесным экосистемам с учетом фактора планирования (создания и развития) ТСЛФ. На базе представленного в статье методологического аппарата будет разработана информационно-аналитическая система прогнозной оценки эколого-экономического ущерба от лесных пожаров. Данное программное обеспечение станет

полезным при выработке стратегии лесохозяйственных мероприятий, направленных на охрану, защиту и воспроизводство лесов.

В целях обоснования представленного в статье метода рассмотрим использование разработанного теоретического аппарата на практическом примере. Согласно выражению (1) определим вероятность возникновения k -х лесных пожаров. Результат прогностических расчетов представлен на рис. 4 (анализу подлежал не каждый квартал участковых лесничеств, просчитаны вероятности возникновения k -х лесных пожаров, на прогнозную карту-схему занесены очаги возгорания, вероятность возникновения которых составляет более 50 %).

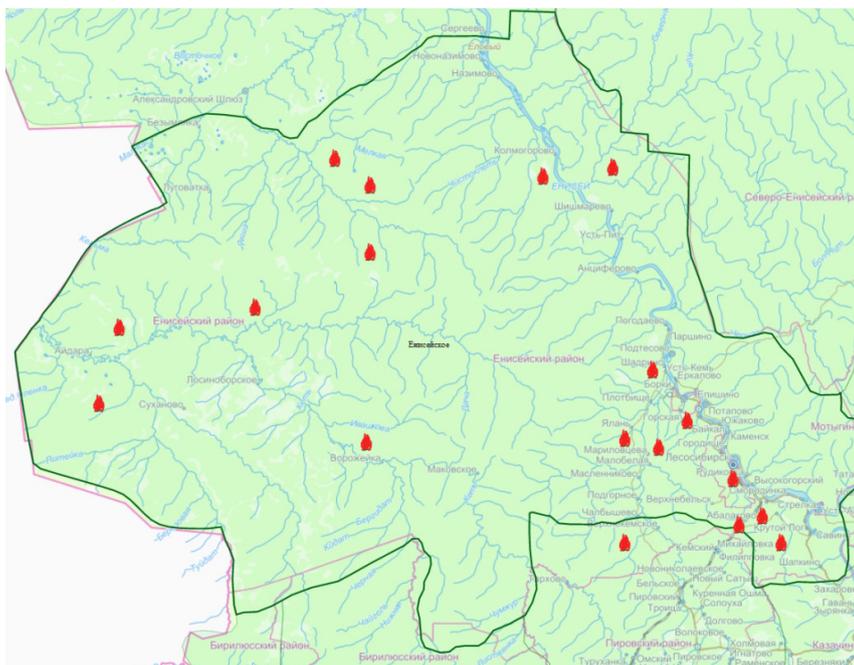


Рис. 4. Прогнозная карта лесных пожаров на 2021 г.

Fig. 4. Forecast map of forest fires for 2021

Согласно расчетным данным, представленным на рис. 4, наибольшая вероятность возникновения пожаров по причине антропогенного фактора существует в юго-восточной части Енисейского лесничества, в местах пролегания участков дорожной сети, характеризующейся высокой плотностью вблизи крупных населенных пунктов. Прогнозируемая скорость распространения данных пожаров ввиду наличия транспортной сети не превысит порог в 2 га. На северо-западе Енисейского лесничества дорог мало, основная их доля приходится на лесовозные и лесные пути, поэтому процент возникновения в этой области лесных пожаров по вине населения фактически отсутствует, в качестве основной причины выступают грозовые разряды. Прогнозируемая скорость распространения здесь огня ввиду отсутствия транспортной сети превысит порог в 100 га. Пожары в северо-восточной и южной частях лесничества могут происходить по разным причинам, но, согласно статистическим данным, бывают крайне редко.

Таким образом, с учетом факторов, влияющих на интенсивность распространения k -х пожаров (природно-климатических и географических условий, возможных временных потерь при тушении k -го пожара [2, 12]), прогнозная суммарная площадь их распространения составит 4496,27 га. На базе карты лесных пожаров (рис. 4) посредством разработанного методологического аппарата рассчитаем предполагаемую величину эколого-экономического ущерба лесным экосистемам. Для этого определим прогнозируемые: суммарные затраты на тушение и ликвидацию негативных последствий лесных пожаров с учетом уровня развития лесотранспортных сетей; потери валовой выручки и суммарный ущерб от повреждения ресурсов по видам лесопользования за весь период восстановления территории. Результаты произведенных расчетов следующие:

1) прогнозируемые суммарные удельные потери валовой выручки по видам лесопользования:

от подсочки леса, 16 425 000 руб./га;

от побочного лесопользования: туризма, охоты, спорта и др., 4 068 816 руб./га;

от продуцирования углерододепонирующей функции лесов, 216 316 800 руб./га;

посредством отпуска древесины на корню, $5\,271\,428,9 \cdot 10^{-6}$ руб./га;

по видам лесопользования за весь период восстановления территории лесного фонда, 382 542 196,7 руб./га;

2) прогнозная оценка суммарного ущерба от повреждения ресурсов по видам лесопользования:

от снижения почвозащитных, санитарно-гигиенических, водоохраных и других средообразующих функций леса, 6 998 888 руб./га;

от загрязнения воздушной среды продуктами горения, 6 998 888 руб./га;

от гибели животных и растений, включая виды, занесенные в Красную книгу, 438 642,4 руб./га;

от повреждения ресурсов побочного лесопользования, 686 720 руб./га;

примерная стоимость сгоревших объектов и готовой продукции в лесу на момент составления прогноза, 87 728,48 руб./га;

по видам лесопользования за весь период восстановления территории, 49 325 205,7 руб./га.

Исходя из анализа результативных расчетных показателей произведенного эксперимента на обозначенной пилотной территории можно заключить следующее:

в целях снижения величины эколого-экономического ущерба лесным экосистемам на территории Енисейского лесничества необходимо усилить наблюдение за местами возможных очагов возгораний согласно прогнозной карте лесных пожаров на 2021 г.;

в западной части Енисейского лесничества лесные пожары, возникающие из-за грозных разрядов, имеют катастрофический характер ввиду транспортной недоступности данной лесной территории – на ней требуется развитие лесной дорожной сети в целях оперативной ликвидации очагов возгораний и последствий лесных пожаров;

для снижения количества лесных пожаров, возникающих по вине человека, следует чаще проводить противопожарную пропаганду среди местного населения, использовать штрафные санкции к виновникам возгораний.

Заключение

Тушение лесных пожаров необходимо, но высокзатратно, что обусловлено в том числе отсутствием на территориях лесного фонда страны достаточно развитой транспортной системы. Такая система является неотъемлемым компонентом современного лесного биогеоценоза и способствовала бы не только тушению пожаров и последующему проведению лесовосстановительных работ с наименьшими затратами, но и обеспечивала бы выполнение всего комплекса противопожарных мероприятий.

В настоящее время нет единого научного подхода к определению величины общего эколого-экономического ущерба от лесных пожаров на основе экосистемного принципа, учитывающего многостороннее назначение лесных благ и уровень развития транспортной сети, непосредственно влияющий на этот показатель. Остаются открытыми вопросы сокращения вреда, наносимого пожарами экосистемам, прогнозирования величины ущерба и ускорения процесса лесовосстановления под влиянием транспортного фактора.

Предлагаемый метод оценки величины эколого-экономического ущерба лесным экосистемам с учетом фактора обеспечения транспортной доступности территорий, на которых они располагаются, позволит производить: более точное прогнозирование вероятности возникновения на конкретных участках возгораний, разработку рациональных стратегий их предотвращения и создание оптимальных резервов, достаточных для устранения последствий лесных пожаров, которые не удалось предотвратить. Метод учитывает сокращение количества лесных ресурсов и изменение средоформирующих и социальных функций леса в динамике в послепожарный период.

Посредством расчетно-численного эксперимента была определена прогнозная оценка величины эколого-экономического ущерба лесным экосистемам Енисейского лесничества. Результативные показатели экспериментальных вычислений составили: суммарные затраты на тушение k -х пожаров, 26 296 400 руб./га; суммарные затраты на восстановление l -го лесного ресурса, 31 554 784 руб./га; суммарные затраты на планирование транспортной сети на территории лесного фонда, 45 000 000 руб./га; потери валовой выручки и суммарный ущерб от повреждения ресурсов по видам лесопользования за весь период восстановления территории лесного фонда, 382 542 196,7 руб./га и 49 325 205,7 руб./га соответственно; величина и суммарная величина эколого-экономического ущерба лесным экосистемам, 534 718 586,4 руб./га и 2 406 235,5 тыс. руб. соответственно; период восстановления территории лесного фонда, 95 лет.

Из приведенных расчетов следует, что затраты на строительство лесных дорог составляют 8,4 % от величины прогнозируемого ущерба лесным экосистемам от пожаров. Следовательно, развитие лесной дорожной сети на пилотной территории является целесообразным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Апулеев И.* Миллиарды за зверя: Минприроды обновило стоимость фауны // Газета.ru. 2019. 20 сент. Режим доступа: <https://www.gazeta.ru/business/2019/09/20/12663211.shtml> (дата обращения: 29.09.2019).
Apuleyev I. Billions for the Beast: The Ministry of Natural Resources Has Updated the Cost of Fauna. *Gazeta.Ru*. 2019.
2. Архив погоды в Енисейске // ООО «Расписание Погоды». Режим доступа: https://rp5.by/Архив_погоды_в_Енисейске (дата обращения: 25.02.2021).
Weather Archive in Yeniseisk. ООО «*Raspisaniye Pogody*». 2021.
3. *Болданова Е.В., Богомолова Е.Ю., Давыдова Г.В.* Многомерная характеристика влияния плотности лесных дорог на объем лесовосстановления и площадь лесных пожаров // Изв. Байкал. гос. ун-та. 2017. Т. 27, № 3. С. 350–358.
Boldanova E.V., Bogomolova E.Y., Davydova G.V. Multidimensional Characteristics of the Influence of Forest Road Density on the Volume of Reforestation and the Area of Forest Fires. *Izvestiya Baykal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Baikal State University], 2017, vol. 27, no 3. pp. 350–358. DOI: [https://doi.org/10.17150/2500-2759.2017.27\(3\).350-358](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2017.27(3).350-358)
4. *Болотов О.В., Ельдештейн Ю.М., Болотова А.С., Горяева Е.В., Мохирев А.П.* Основы расчета и планирования устойчивого управления лесопользованием: моногр. Красноярск: СибГТУ, 2005. 183 с.
Bolotov O.V., Eldestein Yu.M., Bolotova A.S., Goryayeva E.V., Mokhirev A.P. *Fundamentals of Calculation and Planning of Sustainable Forest Management*: Monograph. Krasnoyarsk, SibGTU Publ., 2005. 183 p.
5. *Буряк Л.В., Иванов В.А., Зленко Л.В.* Лесообразовательный процесс в нарушенных пожарами светлехвойных насаждениях Нижнего Приангарья // Фундаментальные исследования. 2015. № 2(8). С. 1709–1714.
Buryak L.V., Ivanov V.A., Zlenko L.V. Forest Formation Processes in Violation Fire Light Coniferous Plantations Lower Angara Region. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental Research], 2015, no. 2(8), pp. 1709–1714.
6. *Бутусов О.Б., Редикутьева Н.И., Никифорова О.П.* Балансовая математическая модель динамики лесных гарей // Междунар. науч.-исслед. журн. 2016. № 5(47), ч. 6. С. 75–79.
Butusov O.B., Redikultseva N.I., Nikiforova O.P. Balance Mathematical Model of Burnt-out Forests Areas Dynamics. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2016, no. 5(47), part 6, pp. 75–79. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.47.156>
7. *Васильев Д.В.* Анализ естественного и искусственного возобновления на гарях 2010 года для выявления оптимальных условий после пожарного лесовосстановления в Юринском лесничестве // Мир науки и инноваций. 2015. Т. 15. С. 37–42.
Vasil'yev D.V. Analysis of Natural and Artificial Regeneration on Burned Areas in 2010 to Determine the Optimal Conditions after Fire Reforestation in Yurino Forestry. *Mir nauki i innovatsiy* [World of science and innovation], 2015, vol. 15, pp. 37–42.
8. *Волокитина А.В.* Методические аспекты характеристики лесных участков после пожара // Вестн. Томск. гос. ун-та. 2015. № 3(31). С. 84–98.
Volokitina A.V. Methodical Aspects for Describing Post-Fire Forest Site. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* [Tomsk State University Journal of Biology], 2015, no. 3(31), pp. 84–98. DOI: <https://doi.org/10.17223/19988591/31/7>
9. *Гаврилова О.И., Пак К.А.* Естественное восстановление леса после пожаров в республике Карелия // Успехи современного естествознания. 2017. № 12. С. 38–44.

Режим доступа: https://www.natural-sciences.ru/pdf/2017/2017_12.pdf (дата обращения: 01.06.2021).

Gavrilova O.I., Pak K.A. Natural Forest Restoration after Fires in the Republic of Karelia. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in Current Natural Sciences], 2017, no. 12, pp. 38–44.

10. Громская Л.Я., Артемьев В.В., Левушкин Д.М. Методика определения стоимости строительства лесных автомобильных дорог // Лесн. вестн. 2019. Т. 23, № 1. С. 77–83.

Gromskaya L.Ya., Artem'yev V.V., Levushkin D.M. Method of Determining Forest Roads Construction Cost. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2019, vol. 23, no. 1, pp. 77–83. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-1-77-83>

11. Денисов С.А., Конюхова Т.А., Рачкова Т.С. Управление лесовосстановлением на горяч // Вестн. ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 3(27). С. 5–17. Режим доступа: <https://www.volgatech.net/upload/iblock/3a0/3a06706417d5d74b6ce111bfb38e30a6.pdf> (дата обращения: 01.06.2021).

Denisov S.A., Konukhova T.A., Rachkova T.S. Forest Restoration Management at the Fire Sites. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovaniye* [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management], 2015, no. 3(27), pp. 5–17.

12. КГАУ «Лесопожарный центр». Режим доступа: <http://www.lpcentr.ru/> (дата обращения: 25.02.2021).

KGAU "Forest Fire Center". 2021.

12. Лесные пожары в России. Статистика и антирекорды // ТАСС. 2019. 29 июля. Режим доступа: <https://tass.ru/info/6712527> (дата обращения: 31.05.2021).

Forest Fires in Russia. Statistics and Anti-Records. TASS. 2019.

14. Лесохозяйственный регламент Северо-Енисейского лесничества: в ред. приказов министерства лесного хозяйства Красноярского края от 11.04.2019 № 676-од, от 20.01.2020 № 86-102-од, от 20.04.2020 № 86-742-од, от 12.03.2021 N 86-508-од. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/550243026> (дата обращения: 25.02.2021).

Forest Management Regulations of the North-Yenisey Forestry: As Amended by the Orders of the Ministry of Forestry of Krasnoyarsk Krai of April 11, 2019 No. 676-od, of January 20, 2020 No. 86-102-od, of April 20, 2020 No. 86-742-od, of March 12, 2021 No. 86-508-od.

15. Макаров В.П., Малых О.Ф., Горбунов И.В., Пак Л.Н., Зима Ю.В., Банищикова Е.А., Желибо Т.В. Влияние пожаров на флористическое разнообразие сосновых лесов Восточного Забайкалья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 1. С. 77–86.

Makarov V.P., Malykh O.F., Gorbunov I.V., Pak L.N., Zima Yu.V., Banshchikova E.A., Zhelibov T.V. Influence of Fires on Pine Forest Floristic Diversity of the Eastern Transbaikalian Territory. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.77>

16. Матвеева Т.А., Матвеев А.М. Экологическая роль лесных пожаров // Успехи современного естествознания. 2012. № 10. С. 107–109. Режим доступа: <http://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=30894> (дата обращения: 22.09.2019).

Matveyeva T.A., Matveyev A.M. Ecological Role of Forest Fires. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in Current Natural Sciences], 2012, no. 10, pp. 107–109.

17. Мусеева Е.Е., Южаков Д.В. Экономическая эффективность противопожарных мероприятий // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2009. № 23. С. 211–214. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22747020> (дата обращения: 01.06.2021).

Moiseyeva E.E., Yuzhakov D.V. Economic Efficiency of Fire Prevention Measures. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*, 2009, no. 23, pp. 211–214.

18. Морозова А. Сколько стоит потушить лесные пожары в Сибири. Три варианта // 66.ru. 2019. 1 авг. Режим доступа: <https://66.ru/news/society/223701/> (дата обращения: 25.02.2021).

Morozova A. How Much Does It Cost to Extinguish Forest Fires in Siberia. Three Options. *Network Publication "Modern Portal of Yekaterinburg – 66.ru"*. 2019.

19. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 8 июля 2014 г. № 313 «Об утверждении Правил тушения лесных пожаров» (с изменениями и дополнениями на 16 февр. 2017 г.) // Гарант.Ру: информ.-прав. портал. Режим доступа: <https://base.garant.ru/71674632/> (дата обращения: 22.02.2021).

Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation of July 8, 2014 No. 313 "On Approval of the Rules for Extinguishing Forest Fires".

20. Потанова Е.В. Экономическая оценка ущербов лесам от пожаров с учетом экологических рисков (на территории Свердловской области) автореф. дис. ... канд. экон. наук. Новосибирск, 2006. 22 с.

Potapova E.V. *Economic Assessment of Forest Damage from Fires, Taking into Account Environmental Risks: In the Sverdlovsk Region*: Cand. Econ. Sci. Diss. Abs. Novosibirsk, 2006. 22 p.

21. Потанова Е.В. Математический подход к оценке величины ущерба лесным экосистемам // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2007. Т. 2, № 2. С. 190–194.

Potapova E.V. A Mathematical Approach to Assessing the Damage to Forest Ecosystems. *Interekspo Geo-Siberia*, 2007, vol. 2, no. 2, pp. 190–194. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201403353>

22. Сныткин Г.В. Лесные пожары и борьба с ними на Крайнем Северо-Востоке Сибири: дис... д-ра с.-х. наук. М., 2002. 314 с.

Snytkin G.V. *Forest Fires and Fight against Them in the Far North-East of Siberia*: Dr. Agric. Sci. Diss. Moscow, 2002. 314 p.

23. Хильченко Н.В., Литвинова А.А., Пашина О.С. Оценка эколого-экономического ущерба (методы и практика): [методика]. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2004. 32 с.

Khil'chenko N.V., Litvinova A.A., Pashnina O.S. *Assessment of Ecological and Economic Damage (Methods and Practice)*. Yekaterinburg, Institute of Economics UB RAS Publ., 2004. 32 p.

24. 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, vol. 261, iss. 4, pp. 811–820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.11.020>

25. Burke C.P., Jones D.L. On the Polarity and Continuing Current in Unusually Large Lightning Flashes Deduced from ELF Events. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1996, vol. 58, iss. 5, pp. 531–548. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(95\)00054-2](https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00054-2)

26. 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, vol. 178, pp. 163–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.08.007>

27. 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, vol. 55, iss. 1-2, pp. 197–211. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020207710195>

28. González Cabán A. Wildland Fire Management Policy and Fire Management Economic Efficiency in the USDA Forest Service. *Proceedings of the IV International Wildland Fire Conference*. Seville, Spain, 2007. 17 p. Available at: <http://gfmc.online/iwfc/sevilla-2007/Keynote-Gonzales-Caban.pdf> (accessed 22.02.21).

29. Hansen A.J., Spies T.A., Swanson F.J., Ohmann J.L. Conserving Biodiversity in Managed Forests: Lessons from Natural Forests. *BioScience*, 1991, vol. 41, iss. 6, pp. 382–392. DOI: <https://doi.org/10.2307/1311745>

30. Martinez-Harms M.J., Bryan B.A., Balvanera P., Law E.A., Rhodes J.R., Possingham H.P., Wilson K.A. Making Decisions for Managing Ecosystem Services. *Biological Conservation*, 2015, vol. 184, pp. 229–238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.01.024>

31. Schaich H., Milad M. Forest Biodiversity in a Changing Climate: Which Logic for Conservation Strategies? *Biodiversity and Conservation*, 2013, vol. 22, iss. 5, pp. 1107–1114. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-013-0491-7>

32. Soriano L.R., de Pablo F., Tomas C. Ten-Year Study of Cloud-to-Ground Lightning Activity in the Iberian Peninsula. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2005, vol. 67, iss. 16, pp. 1632–1639. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.08.019>

33. Venier L.A., Thompson I.D., Fleming R., Malcolm J., Aubin I., Trofymow J.A., Langor D., Sturrock R., Patry C., Outerbridge R.O., Holmes S.B., Haeussler S., de Grandpré L., Chen H.Y.H., Bayne E., Arsenault A., Brandt J.P. Effects of Natural Resource Development on the Terrestrial Biodiversity of Canadian Boreal Forests. *Environmental Reviews*, 2014, vol. 22(4), pp. 457–490. DOI: <https://doi.org/10.1139/er-2013-0075>

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF FIRES ON FOREST ECOSYSTEMS CONSIDERING THE LEVEL OF DEVELOPMENT OF THE FOREST TRANSPORTATION NETWORK

*Rudolf N. Kovalev*¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [B-3695-2017](https://orcid.org/0000-0001-8928-8765),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8928-8765>

*Irina M. Enaleeva-Bandura*², Candidate of Engineering, Research Scientist;
ResearcherID: [AAK-5364-2021](https://orcid.org/0000-0001-7032-9512), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>

*Alexandr V. Nikonchuk*², Candidate of Engineering, Research Scientist;
ResearcherID: [AAI-9139-2021](https://orcid.org/0000-0002-9159-7978), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9159-7978>

¹Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: kir9624@yandex.ru

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. im. gaz. «Krasnoyarskiy rabochiy», 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; e-mail: melnikov1978@inbox.ru, n_alex_krsk@mail.ru

Abstract. Currently, we can state the fact that there is no developed unified scientific approach to determining the degree of the total ecological and economic damage from forest fires based on the ecosystem approach, taking into account the multipurpose of forest benefits and the dependence of achieving the effectiveness of forestry and fire-fighting measures on the level of development of the transportation network on the territory of the forest fund. Hence, we can conclude that the development of a method for assessing the magnitude of ecological and economic damage from fires to forest ecosystems considering the factor of planning a forest road network is an urgent scientific issue. In this regard, the purpose of the article is to develop a methodology for assessing the degree of ecological and economic damage from fires to forest ecosystems, taking into account the planning factor of the forest road network and its testing. Within this framework, the article outlines the issues under study concerning the need for forecasting: the probability of forest fires, the area of their spread over the territory of the forest fund, the assessment of the degree of the possible ecological and economic damage to forest ecosystems. The study of these issues is necessary for the timely implementation of fire-prevention and restoration measures, as well as the determination

of the value of optimal reserves sufficient to eliminate the consequences of forest fires, the assessment of the correlation of the indicator of total ecological and economic damage from fires with the level of development of the transportation network, which directly affects this indicator. The article presents a mathematical model developed by the authors, which forms the basis of the proposed method for assessing the degree of ecological and economic damage from fires considering the factor of planning the creation and development of the forest road network. The presented methodological development is based on the tools of economic and mathematical modeling, elements of the theory of probability and combinatorics, as well as an integrated interdisciplinary approach to the research object. The article also presents the results of a computational and numerical experiment using the developed methodological apparatus. The methodology proposed by the authors can be used in identifying the most fire-hazardous areas of the forest fund, development of measures to preserve biodiversity, planning logging, reforestation work, etc.

For citation: Kovalev R.N., Enaleeva-Bandura I.M., Nikonchuk A.V. Assessment of the Impact of Fires on Forest Ecosystems Considering the Level of Development of the Forest Transportation Network. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 131–149. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-131-149

Keywords: forest fires, forest fund lands, ecological and economic damage, forest road network.