

## ЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 630\*114:630\*43

doi: 10.17223/19988591/58/8

### Лесозокологические последствия ландшафтных пожаров в Забайкалье

Михаил Данилович Евдокименко<sup>1</sup>,  
Леонид Владиленович Кривобоков<sup>2</sup>, Алексей Евгеньевич Петренко<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> *Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия*

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2065-236X>, [evdokimenko@ksc.krasn.ru](mailto:evdokimenko@ksc.krasn.ru)

<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4105-6281>, [leo\\_kr@mail.ru](mailto:leo_kr@mail.ru)

<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3444-5297>, [alcorsi@bk.ru](mailto:alcorsi@bk.ru)

**Аннотация.** Отмечаются региональные особенности возникновения ландшафтных пожаров. Изучены и классифицированы пироэкологические режимы растительности (благополучный, умеренный, интенсивный, экстремальный) при различной метеоситуации по всем высотно-поясным комплексам (ВПК). Установлены основные параметры для каждого варианта: потенциальные масштабы и длительность пожароопасного состояния в зависимости от ВПК. Ландшафтные пожары возникают при интенсивном и экстремальном режимах, по мере образования на больших территориях состояния пироэкологической монотонности (отсутствие негоримых по естественным причинам участков ландшафта). За последнее время пироэкологические аномалии с ландшафтными пожарами происходили в 2003 и 2015 гг. Обширные ландшафтные пожары в светлосредственных лесах оставляют за собой насаждения, включающие участки поврежденных и погибших деревьев, в зависимости от вида и интенсивности огневого воздействия. Далее в процессе послепожарного лесовосстановления формируется сложная мозаика группово-разновозрастных древостоев, периодически модифицируемая повторными пожарами. При тяжелых поражениях древостоев восстановление их допожарной полноты и запаса растягивается на длительное время, а после повторных пожаров развивается пироэкологическая дигрессия с катаклизмом и неизбежной утратой экологического значения насаждений. Иллюстрируется вековая динамика основных таксационных показателей в пироэкологических древостоях. Установлены аналитические зависимости изменений жизнеспособности деревьев после интенсивного низового пожара от их морфологических признаков. Резюмируется негативное влияние ландшафтных пожаров с последующим локальным обезлесением на экологическую ситуацию в регионе.

**Ключевые слова:** лесные экосистемы, ландшафтные пожары, фитоценозы, дигрессия, обезлесение, сток

**Источник финансирования:** работа выполнена в рамках фундаментальных научных исследований по программам РАН № 0287-2021-0010, номер НИОКТР 121030900181-4 «Научные основы сохранения ресурсного и экологического потенциала лесов Сибири в условиях кумулятивных антропогенных и природных рисков» и № 0287-2021-0009, номер НИОКТР 121031500336-9 «Функциональ-

но-динамическая индикация биоразнообразия лесов Сибири», а также, частично, при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-44-240008 р\_а\_Красноярск – сбор полевого геоботанического материала и его обработка.

**Для цитирования:** Евдокименко М.Д., Кривобоков Л.В., Петренко А.Е. Лесозоологические последствия ландшафтных пожаров в Забайкалье // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2022. № 58. С. 153–180. doi: 10.17223/19988591/58/8

Original article

doi: 10.17223/19988591/58/8

## Environmental Consequences of Landscape Fires in Trans-Baikal Forests

Michael D. Evdokimenko<sup>1</sup>, Leonid V. Krivobokov<sup>2</sup>, Alexey E. Petrenko<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> VN Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia Federation

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2065-236X>, [evdokimenko@ksc.krasn.ru](mailto:evdokimenko@ksc.krasn.ru)

<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4105-6281>, [leo\\_kr@mail.ru](mailto:leo_kr@mail.ru)

<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3444-5297>, [alcorsci@bk.ru](mailto:alcorsci@bk.ru)

**Summary.** Landscape fires play the leading role in the modern anthropogenic dynamics of forest ecosystems in south-eastern Siberia. Forest pyrologists consider them the most destructive manifestation of fires – an environmental factor that acts across wide areas to change the state of landscapes. Due to the insufficient knowledge of the nature of pyrogenic forest ecosystems, especially its dynamic aspects in the forest-forming process, obtaining data on the pyrogenic dynamics of forest ecosystems belonging to various ranks is of broad scientific interest. A new aspect of this study is assessing ecosystem transformations under various pyrological regimes that determine the pyrogenic successions of plant communities, the hydrothermal regime of soils, a post-fire runoff, etc. The history of catastrophic landscape fires in the Baikal and Trans-Baikal regions began after the construction of the Trans-Siberian Railway. At that time, a long strip of coastal hemiboreal small-leaved deciduous forests formed along the southern shore of Lake Baikal, in the area of indigenous dark coniferous taiga, as a result of the “selective” impact of a lingering series of fires that followed intense forest harvesting. It happened regardless of the average productivity of the pyrogenic stands being 30–40% lower vs. the potential level. The landscape fires of the 1930–1950s that arose during industrial development, especially in the areas of intense forest harvesting, caused heavy damage to forest ecosystems throughout Transbaikalia. Now, due to a regress in the Russian forest management, landscape fires have turned into an archaic alternative to the ecological progress as of the 1970s and 1980s. Therefore, the relevant goal of this article is to consider the transformation of forest ecosystems after landscape fires.

The emergence and spread of landscape fires were studied during two fire-intensive seasons through the air monitoring of the Trans-Baikal territory. Geographic coordinates: 49–57° N, 99–122° E. Regular pyrological studies of the seasonal dynamics of the forest fire danger implied the use of the method suggested by N.P. Kurbaty (1970) [9]. The permanent trial plots were located on the Malkhansky and Khamar-Daban Mountain Ranges. The route studies covered the Selenga Highlands, as well as the basins of the Rivers Barguzin, Turka, Upper Angara, Muya, and Chara.

Fig. 1 shows the schematic map of the sites. The pyrological regimes of vegetation complexes were established based on research data (see the table). The environmental consequences of landscape fires were studied in the forests of South-Eastern Baikal and Central Transbaikalia. The closest observations of the dynamics of burned (including through prescribed burning) and control stands were performed on permanent sample plots. There the researchers also ensured regular accounting of litterfall using special 1×1m collectors. The grain composition and physical and mechanical properties of the soils were determined via the common methods [21]. The pyrogenic variations of the forest-forming process after landscape fires were observed in different natural districts (Fig. 2).

Pyrological regimes differ in the altitude-belt complexes (ABC) of vegetation and correspond to a wide range of atmospheric moistening. Forest-steppe vegetation prevails in the valleys of large rivers and low mountains in the conditions of extremely insufficient moistening. This vegetation is exposed to an extreme fire regime in the spring and in the early summer. The Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) prevails in sub-taiga-forest-steppe forests. There, an intense regime takes place even in a standard weather situation. The fire maturation of forests in the light-coniferous taiga belt with predominant larches (*Larix sibirica* Ledeb., *Larix gmelini* Rupr.) is approximately two times longer vs. forest-steppe and hemiboreal forests. Accordingly, the pyrological regimes vary from intense to moderate. Dark coniferous forests comprising the Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour.), fir (*Abies sibirica* Ledeb.) and spruce (*Picea obovata* Ledeb.) are confined to wet belts with a moderate pyrological regime. A safe regime prevails in the subalpine ABC. The general fire danger is determined by ground fires, after which most burned forests retain their vitality at the level of their fire resistance, as well as depending on the actual intensity of fire in this area. Fig. 3 illustrates the typical dynamics of Scots pine stands established based on forest management data. In fact, diverse structural transformations of plant communities are observed after landscape fires – from a moderate fire damage to heavy thinning caused by an intense fire, and even complete death after head fires with probable local deforestation. Fig. 4 shows the comparative dynamics of the population of trees in normal and pyrogenic larch forests. Larch trees have an advantageous position vs. pines, as they are better protected from thermal damage by their thick bark. Besides, the crowns of larch trees are capable of regenerating needles and shoots damaged by fire. The duration of recovery to the pre-fire basal area increases exponentially with age, since forest stands inevitably face a growth decline as they become old. The pyrogenic digression of larch forests in permafrost areas with a burned peat horizon was followed by a tree fall, which was observed during the air monitoring of fires. Later thickets of birch and willow trees formed there. The fire damage to trees (trunks and crown), the ground cover, as well as the hydrothermal regime of soils are most comprehensively studied in the Scots pine forests of Central Transbaikalia where the ground cover and lower forest layers were explored not only at natural fire sites but also through prescribed burning. The integral picture of forest disturbance with landscape fires is complex and diverse. On mountain slopes, the strongest fire was observed when it was moving upwards. The speed and direction of the wind, as well as the daily temperature and humidity rhythm played a significant role in the spread of the fire line. Therefore, extensive landscape fires left behind a chaotic structure of damaged and dead stands. Later, a complex mosaic of uneven-aged stands modified by repeated fires formed during post-fire reforestation. After high-intensity fires, the forest plant communities were locally replaced by steppe ones, while reforestation took entire decades. Successions after fires were different. Extensive fires in the upper taiga ABC used to lower the upper boundary of the forest belt. Meanwhile, situations being destructive for the forest ecosystems of Transbaikalia regularly recurred, which was clearly seen based on the 200-year dynamics of the tree-ring width of the Scots pine in the River Turka valley. The tree diagram in Fig. 5 unambiguously shows a sharp de-

cline in the width of tree rings at the turn of the 19<sup>th</sup>-20<sup>th</sup> centuries when the Trans-Siberian Railway was built. One may also identify drought periods in the 1930–1970s. The pyrogenic anomaly of 2015 that covered over 10% of the Baikal region turned out to be extremely dangerous.

*The article contains 5 Figures, 1 Table and 58 References.*

**Keywords:** forest ecosystems, landscape fires, plant communities digression, deforestation, drainage

**Fundings:** The work was carried out within the framework of fundamental scientific research programs of the Russian Academy of Sciences No. 0287-2021-0010, state registration number No. 121030900181-4 “Scientific Foundations of the Conservation of the Resource and Ecological Potential of Siberian Forests under the Conditions of Cumulative Anthropogenic and Natural Risks” and No. 0287-2021-0009, state registration number No. 121031500336-9 “Functional-dynamic Indication of Biodiversity of Siberian Forests”, and, in part, with the financial support of the RFBR, Krasnoyarsk Territory and Krasnoyarsk Regional Fund of Science, project number 20-44-240008 r\_a\_Krasnoyarsk - collection of field geobotanical material and its processing.

**For citation:** Evdokimenko MD, Krivobokov LV, Petrenko AE. Forest ecological consequences of landscape fires in Transbaikalia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2022;58:153-180. doi: 10.17223/19988591/57/8

## Введение

Ландшафтным пожарам принадлежит ведущая роль в современной антропогенной динамике лесных экосистем на юго-востоке Сибири [1–5]. Кроме того, современная пирогенная обстановка на стыке бореальной и умеренной ландшафтных зон Евразии тесно связана с проблемами глобального изменения климата под влиянием увеличения выбросов в атмосферу парниковых газов [6–8]. По определению Н.П. Курбатского [9], к категории ландшафтных относятся растительные пожары, охватившие площадь, занятую двумя и более подтипами растительности. И.С. Мелехов [10] считал их наиболее грандиозным и разрушительным проявлением огненной стихии – экологическим фактором, действующим на большие территории, изменяющим состояние местного ландшафта. Отмечалась недостаточная изученность природы пирогенных лесных экосистем, в особенности динамических ее аспектов в лесообразовательном процессе.

Получение данных о природе ландшафтных пожаров, особенно о пирогенной динамике лесных экосистем разного ранга, представляет широкий научный интерес. Новым аспектом в изучении данного вопроса представляется проведенное нами исследование трансформаций экосистем при различных пирологических режимах, которые детерминируют пирогенные сукцессии фитоценозов, гидротермический режим почв, послепожарный сток и др.

Хозяйственная история ландшафтных пожаров, оказавших катастрофическое воздействие на лесные экосистемы Прибайкалья и Забайкалья, началась вслед за сооружением Транссибирской железной дороги (Транссиба). Тогда вдоль южного берега оз. Байкал на месте коренной темно-

хвойной тайги образовалась протяженная полоса прибрежных гемибореальных мелколиственных лесов – результат «селективного» воздействия на таежные экосистемы затянувшейся череды пожаров, следовавших за интенсивными лесозаготовками [11]. По данным А.В. Побединского [12], пожары в лесах бассейна оз. Байкал на протяжении этого периода возникали примерно вдвое чаще, чем в лесах Приангарья. Средний уровень продуктивности пирогенных древостоев на северном макросклоне Хамар-Дабана на 30–40% ниже от потенциально возможного [13].

Тяжелый урон лесным экосистемам в зоне Транссиба на юго-востоке Сибири нанесли пожары 1930–1950-х гг., возникавшие при их промышленном освоении, особенно в районах концентрированных лесоразработок.

В настоящее время осложняется неблагоприятная экологическая ситуация и в природном комплексе Байкала. Темнохвойные леса на Хамар-Дабане заметно пострадали от засух [14], а огненная стихия в них может обернуться катастрофическими потерями. Это несовместимо с высоким биосферным статусом объекта Всемирного природного наследия. Поэтому рассмотрение трансформаций лесных экосистем ландшафтными пожарами является целью данного исследования.

### **Материалы и методики исследования**

Рекогносцировочные наблюдения за возникновением, распространением и лесоводственными последствиями ландшафтных пожаров осуществлялись в процессе авиапатрулирования территории изучаемого региона. Регулярные полеты, по большей части ежедневные, на протяжении пожароопасных сезонов 1964–1965 гг. выполнялись первым автором статьи, бывшим летчиком-наблюдателем Забайкальской базы авиационной охраны лесов.

Пиროлогические режимы растительных комплексов установлены по материалам исследований их пожароопасности [15]. Объекты регулярных пиროлогических наблюдений (площадью 0,3–0,8 га) расположены в различных высотных поясах Малханского хребта и на Хамар-Дабане. Маршрутные исследования выполнены в насаждениях преимущественно подтаежно-лесостепного и светлехвойного таежного высотного пояса комплексов (ВПК) в районе Селенгинского Среднегорья, включая долины основных притоков р. Селенга (Чикой, Хилок, Уда), а также по бассейнам рек Баргузин, Турка и Верхняя Ангара, Муя и Чара. Картограмма объектов исследования представлена на рис. 1.

Опытные участки для исследования сезонной динамики процесса пожарного созревания лесных горючих материалов (ЛГМ) отражают характерные группы типов леса. На каждом из них в течение 5-летнего периода прослежена фактическая пожароопасность по методике Н.П. Курбатского [9]. Условия увлажнения в период исследований варьировали: обычная метеоситуация – 3 года, благоприятная – 1, сильная засушливость также наблюдалась в течение одного сезона.

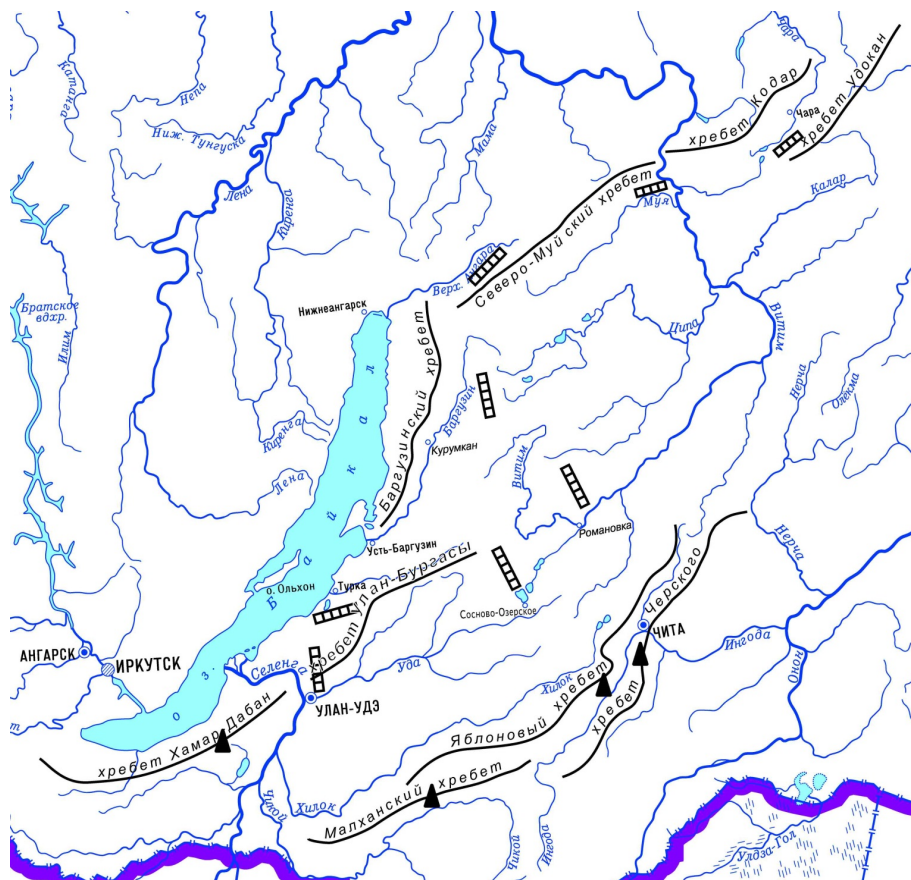


Рис. 1. Схема расположения объектов исследований. Обозначения:

▲ – стационарные исследования; ■■■■ – маршрутные исследования, в том числе авиамониторинг

[Fig. 1. The layout of the objects of research. Legend: ▲ – stationary studies;

■■■■ – route studies, including monitoring from air]

Лесозокологические последствия огневых воздействий разного вида и интенсивности изучали на ландшафтных пожарищах разной давности, а также на участках с экспериментальными выжиганиями напочвенного покрова и подлеска. Пробные площади были заложены в лесах Юго-Восточного Прибайкалья и Центрального Забайкалья, преимущественно в насаждениях, сохранивших жизнеспособность. Эти объекты представляют собой некоторую современную модель лесов, которая может существовать при умеренном пирологическом режиме на протяжении последующих 60–100 лет. На этих площадях определена интенсивность пожара по высоте нагара (обугливания) на стволах деревьев, степени огневых повреждений крон, полноте прогорания напочвенного покрова и др. На каждой пробной площади определяли таксационные показатели древостоя и состояние нижних ярусов в фитоценозах.

Огневые опыты проведены в определенной последовательности относительно метеоусловий. Сила огневых воздействий определялась продолжительностью сухой погоды. Слабое выжигание проведено через 2 дня после дождя, а затем с интервалами в несколько дней проведены последующие опыты с выжиганиями средней и высокой интенсивности. Каждый опытный участок был заранее окаймлен защитной минерализованной полосой, а в процессе выжиганий обеспечивались соответствующие меры пожарной безопасности. Поджигания напочвенного покрова проводили в центре участков, что позволяло отслеживать процесс, а в дальнейшем – последствия огневых воздействий, в зависимости от направления движения кромки «пожаров»: фронт, фланги, тыл. Конфигурация кромки огня фиксировалась через равные интервалы времени, от начала опытов до их окончания.

Наиболее тщательные наблюдения за динамикой горевших и контрольных фитоценозов проведены на постоянных пробных площадях, где все деревья были пронумерованы. Причем на каждом из них Т-образными метками были зафиксированы точки периодических измерений диаметра ствола. На этих же площадях располагались специальные ящики-опадомеры размером 1×1 м для периодического учета опадающих с полога крон отмерших хвой, шишек и других компонентов [16].

Также были изучены пирогенные вариации жизнеспособности деревьев. Критерием (коэффициентом) жизнеспособности было отношение текущего объемного прироста дерева к среднему приросту, что определялось по модельным деревьям, взятым из разных классов по Крафту от I до V с 4-кратной повторностью. Установлена зависимость снижения коэффициента жизнеспособности деревьев после сильного низового пожара от класса по Крафту и от протяженности кроны по стволу (%) [17]:

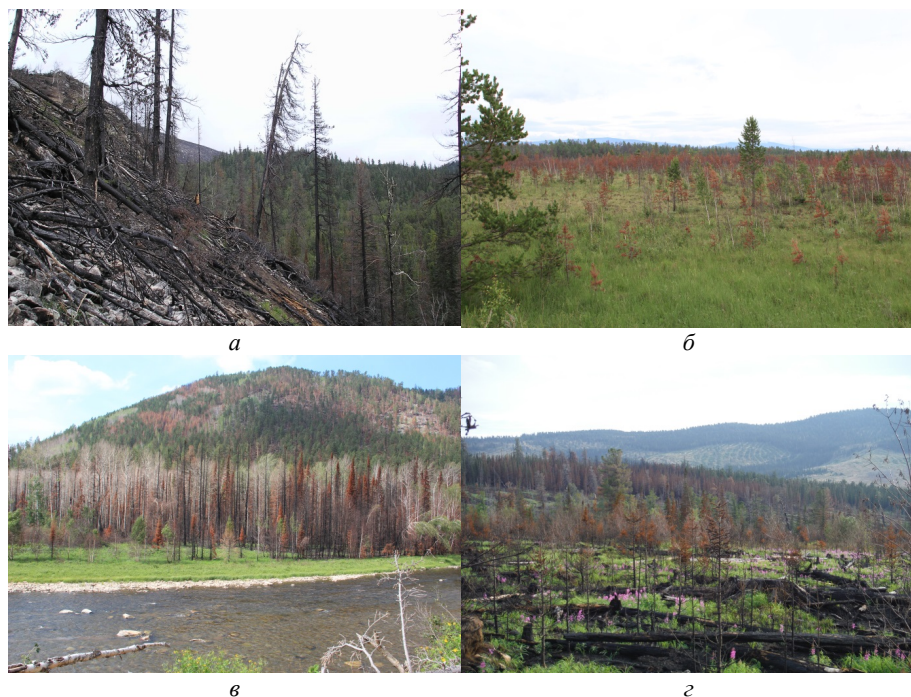
$$y = 41,75 + 9,7x_1 - 21,25x_2 - 7,2x_1x_2,$$

где  $y$  – снижение коэффициента жизнеспособности дерева, %;  $x_1$  – класс дерева по Крафту;  $x_2$  – протяженность кроны по стволу, %.

Для получения данного уравнения использовали методику Ю.П. Адлера и др. [18]. Использовался вариант 2-факторного эксперимента, с фиксированными кодированными уровнями значений для каждого из факторов. Согласно уравнению, минимальные нарушения жизнеспособности отмечаются у деревьев с хорошо развитыми и высокоподнятыми кронами, занимающих в насаждении господствующее положение.

Пирогенные вариации лесообразовательного процесса наблюдали в разных природных округах, преимущественно на ландшафтных пожарах (рис. 2). Для более основательного анализа вековых аспектов роли пирогенного фактора в лесообразовании использовали материалы прошлых экспедиционных исследований, проведенных лесоведами и географами [11, 12, 19, 20]. В почвенном покрове пробных площадей, заложенных для изучения лесоэкологических последствий ландшафтных пожаров, распространены серогумусные хрящевато-тяжелосуглинистые, а также хрящевато-супесчаные почвы. Гранулометрический состав, физико-

химические свойства почв определены общепринятыми методами [21]. Гидротермический режим почв наблюдали на ландшафтных пожарищах в Прибайкалье и в Центральном Забайкалье (сосняки на хребте Черского). Названия растений даны по International Plant Name Index (IPNI) [22].



**Рис. 2.** Современные ландшафтные пожарища в Прибайкалье: *а* – в Баргузинском заповеднике (фото Л.В. Кривобокова); *б* – в долине р. Баргузин (фото А.Е. Петренко); *в* – в долине р. Турка (фото А.Е. Петренко); *г* – на южном макросклоне Хамар-Дабана (фото Л.В. Кривобокова)

**[Fig. 2.** Modern landscape fires in the Baikal Region: *a* – in the Barguzin Reserve (Photo by L. V. Krivobokov); *b* – in the Barguzin River valley (Photo by A. E. Petrenko); *c* – in the Turka River valley (Photo by A. E. Petrenko); *d* – on the southern slope of the Khamar-Daban range (Photo by L. V. Krivobokov)]

## Результаты исследования и обсуждение

Предрасположенность региона к возникновению обширных и длительных лесных пожаров обусловлена специфическими природными предпосылками: засушливый климат на большей части территории, малоснежная зима, сопровождаемая глубокой и длительной весенне-летней засухой с часто повторяющимися сильными ветрами, абсолютное доминирование в лесных массивах пожароопасных типов светлохвойных насаждений [15, 23, 24].

Сообразно широкому высотному диапазону атмосферного увлажнения закономерно дифференцируются пирологические режимы по высотнопоясным комплексам растительности (таблица), характеризующие пожароопасность конкретных категорий, а также лесоэкологические послед-

ствия пожаров. Приведенные нами названия режимов связаны с потенциальной экологической ситуацией после пожаров: благополучный, умеренный, интенсивный, экстремальный. Установлена зависимость пирологических режимов от метеорологических условий с оценками размеров пожароопасной территории, а также вероятной длительности пожароопасного состояния как суммарной за год, так и непрерывной в течение весенне-летнего пожарного максимума. Так, при благополучном режиме пожароопасное состояние возможно лишь фрагментарно (до 10% территории соответствующего ВПК); его суммарная длительность за год не превышает 40 дней, а максимальная непрерывная – до 10 дней. При умеренном варианте эти показатели составляют 11–30% территории, суммарная длительность 41–70, а максимальная непрерывная – 11–20 дней. Интенсивный вариант (31–70%, 71–100 и 21–30 дней, соответственно). При экстремальном режиме наблюдается почти сплошная пожароопасность лесных экосистем – 101–140 и 31–70 дней.

**Пирологические режимы высотно-поясных комплексов  
в бассейне Байкала (весенне-летний период)**

[Pyrological regimes of the altitudinal belt complex in the Baikal basin (spring-summer period)]

| ВПК (преобладающая растительность)<br>[Altitudinal belt complex (prevailing vegetation)]                                                                                                                 | Пирологические режимы [Pyrological regimes] |                                    |                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                          | Обычные сезоны<br>[Regular seasons]         | Засушливые сезоны<br>[Dry seasons] | Влажные сезоны<br>[Wet seasons] |
| Лугово-степной (горная степь)<br>[Meadow-steppe (mountain steppe)]                                                                                                                                       | Экстремальный<br>[Extreme]                  | Экстремальный<br>[Extreme]         | Интенсивный<br>[Intensive]      |
| Подтаежно-лесостепной (сосняки разнотравные и рододендроновые)<br>[Subboreal-forest-steppe (Pine forests with grass and rhododendron)]                                                                   | Интенсивный<br>[Intensive]                  | „                                  | Умеренный<br>[Moderate]         |
| Светлохвойный таежный (сосняки и лиственничники кустарниково-зеленомошные, брусничные и ерниковые)<br>[Light coniferous boreal (Pine and larch forests with subshrubs, moss, cowberry, and dwarf birch)] | „                                           | „                                  | „                               |
| Кедровый таежный (кедровники бруснично-зеленомошные)<br>[Siberian pine boreal (Siberian pine forests with cowberry and moss)]                                                                            | Умеренный<br>[Moderate]                     | Интенсивный<br>[Intensive]         | Благополучный<br>[Prosperous]   |
| Кедрово-пихтовый (кедровники и пихтарники чернично-зеленомошные)<br>[Siberian pine and fir (Siberian pine and fir forests with blueberry and moss)]                                                      | „                                           | „                                  | „                               |
| Субальпийско-подгольцовый (хвойные редколесья и заросли кедрового стланика)<br>[Subalpine-krumholz (coniferous woodlands and dwarf pine thickets)]                                                       | Благополучный<br>[Prosperous]               | Умеренный<br>[Moderate]            | „                               |

Каждому ВПК свойственны свои доминанты в растительности и особенности видового состава [25–27]. В условиях крайне недостаточного увлажнения по долинам крупных рек и низкогорьям преобладают степные комплексы с лесостепью и подтайгой, которые регулярно подвержены экстремальному режиму. В составе лесов подтаежно-леостепного ВПК доминирует сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.). Здесь при обычной метеоситуации характерен интенсивный режим.

Пожарное созревание насаждений в светлохвойном таежном ВПК более растянуто во времени по сравнению с лесостепью и подтайгой примерно вдвое. Сосняки рододендрово-брусничные приходят в пожароопасное состояние за 3–4 дня, а сосняки зеленомошные – лишь через 6–10 дней сухой погоды. В лиственничниках рододендрово-брусничных и в сходных по характеру напочвенного покрова березняках критическая длительность сухой погоды составляет 4–6 дней. В зоне умеренного увлажнения, на холодных и мерзлотных почвах среднегорий, господствуют таежные лиственничники (*Larix sibirica* Ledeb., *Larix gmelini* (Rupr.) Rupr.). Для пожарного созревания лиственничников багульниковых и зеленомошных необходимо 10–15 дней. Пирологические режимы варьируют по времени и территории от интенсивного до умеренного.

К влажным поясам с умеренным пирологическим режимом приурочены темнохвойные комплексы из кедра (*Pinus sibirica* Du Tour.), пихты (*Abies sibirica* Ledeb.) и ели (*Picea obovata* Ledeb.). Растительность, образующая и окаймляющая верхнюю границу леса с характерным для нее избыточным увлажнением и недостатком тепла, представлена сложными субальпийскими комплексами, в которых при обычной метеоситуации превалирует благополучный режим.

Лиственные породы в ненарушенных пожарами и рубками комплексах представлены преимущественно в виде примеси к насаждениям из перечисленных хвойных доминантов. Это береза (*Betula pendula* Roth., *B. ermanii* subsp. *lanata* (Regel) A. K. Skvortsov) и осина (*Populus tremula* L.). После интенсивных пожаров, сопровождающихся значительным изреживанием и отмиранием коренных хвойных насаждений, эти виды образуют собственные производные сообщества.

С пирологической точки зрения на большей части Селенгинского среднегорья отмечается неблагоприятное сочетание ксерофитной степной растительности и высокопожароопасных лесов, произрастающих в условиях засушливого климата. Годовая норма атмосферных осадков здесь в пределах светлохвойного таежного ВПК составляет 250–350 мм, а в подтайге и лесостепи она еще меньше. Причем на долю снега приходится лишь 5–10% от годовой суммы. Поэтому маломощный снежный покров сходит рано, преимущественно испаряясь в сухой воздушной среде, обычно уже в марте, по мере установления положительных значений дневной температуры воздуха при его весьма низкой влажности. В результате напочвенный слой горючих материалов почти не увлажняется талой водой, особенно на южных склонах, из-за ее скудности или полного отсутствия. Сходная ситуа-

ция прослеживается на территории Центрального и Юго-Восточного Забайкалья [28].

Весной и в начале лета на территории, занимаемой лугово-степным, подтаежно-лесостепным и светлохвойным таежным ВПК, как правило, не бывает осадков, способных устранить или хотя бы ослабить пожароопасность. Испаряемость влаги в это время превышает величину осадков в 5–10 раз [28]. На огромных пространствах при интенсивном, а тем более при экстремальном режиме устанавливается на длительное время специфическая пирологическая монотонность, при которой практически отсутствуют какие-либо естественные препятствия для огня из негоримых участков леса. К тому же озера, реки и относительно влажные гребни горных хребтов разрознены и поэтому не задерживают распространение пожаров. Более того, луга и заросли горючих кустарников (ерников), изобилующие в долинах небольших рек (падей), только усиливают интенсивность горения. При порывах ветра в ерниках огонь легко преодолевает узкие водные преграды, оставшиеся снежники и наледи. Причем хаотически разветвляющиеся по горным падям шлейфы пламени стремительно переходят на таежные массивы в широком высотном диапазоне. Такова спонтанная схема возникновения ландшафтных пожаров, которая наблюдалась при авиамониторинге территории Забайкалья.

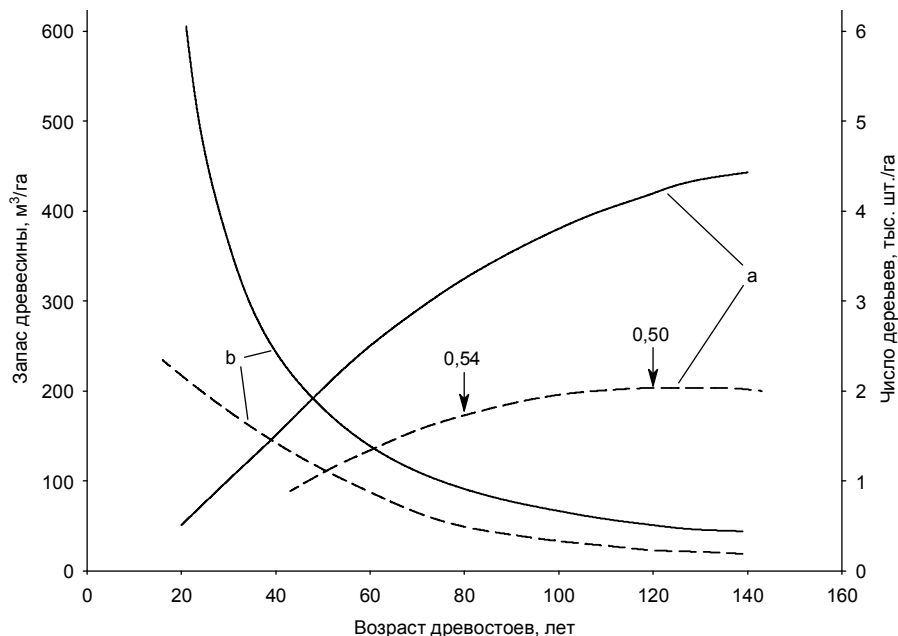
Пожароопасность горно-таежных темнохвойных ВПК наступает существенно позже, по мере схода относительно мощного для Байкальского региона снежного покрова. Так, в таежном кедровом и в кедрово-пихтовом ВПК таяние снега растягивается на весь май, а в субальпийско-подгольцовом ВПК, где распространены заросли пожароопасного кедрового стланика, снег сходит лишь к середине июня. К тому же здесь вследствие высокой влажности мощного мохового покрова и подстилки пожарное созревание протекает медленно и регулярно прерывается обильными атмосферными осадками. Однако на определенных участках встречаются лишайниковые парцеллы, представляющие пожарную опасность.

Ландшафтные пожары на территории верхних лесорастительных поясов возникают редко, однако в отдельные годы, во время длительных летне-осенних засух, они приводят к потерям особо важных для Байкальского природного комплекса кедровых лесов, а в субальпийском поясе после выгорания местообитаний с кедровыми, кедрово-пихтовыми и лиственничными редколесьями с кедровым стлаником понижают верхнюю границу леса.

Согласно лесопожарной статистике, общий фон горимости лесов определяется низовыми пожарами, после которых большая часть горевших насаждений сохраняет жизнеспособность в меру их пожароопасности и огнестойкости, а также фактической интенсивности огня на данном участке. На рис. 3 иллюстрируется типичная картина современной динамики сосновых древостоев, установленная по данным лесоустройства [29].

Ландшафтный пожар, распространившись на большую территорию, представляет собой многообразие физических вариаций стихийного горения, оставляющих за собой в лесных массивах морфологически трансфор-

мированные фитоценозы на пожарищах, от умеренных огневых повреждений под пологом древостоев до их ослабления и полного отмирания вследствие интенсивного низового огня. Наиболее негативный сценарий представляет тотальную гибель деревьев после прохождения верхового пожара с вероятным локальным обезлесением.



**Рис. 3.** Возрастная динамика запасов древесины (a) и густоты древостоев (b) в сосняках. Обозначения: сплошные линии – нормальные насаждения; пунктир – пирогенные (модальные) насаждения; 0,54...0,50 – относительная полнота древостоев  
**[Fig. 3.** The age dynamics of wood stocks (a) and density of forest stands (b) in pine forests.  
 Designations: solid lines are normal plantations; dotted line - pyrogenic (modal) plantings;  
 0.54 ... 0.50 is the relative fullness of tree stands]

Механизм пирогенных трансформаций экосистем с сосновыми насаждениями наиболее детально прослежен на юго-восточном мезосклоне Яблонового хребта, где проводились огневые опыты.

Высота нагара на стволах и степень повреждения крон деревьев обусловлены преимущественно их расположением относительно характерных частей кромки огня. Губительные высота и ширина пламени были на фронтальном направлении, совпадающем с направлением ветра, что однозначно прослеживалось по картам огневых опытов. Фронтальный огонь причинял деревьям наибольшие повреждения. Напротив, совершенно не пострадали деревья, оказавшиеся в зоне тыла огня, где невысокое пламя слегка охватывало комлевые части ствола, камбий которых защищен достаточным слоем корки. Средние значения огневых повреждений отмечались на флангах кромки огня [30].

Нагар на стволах был асимметричным. Односторонний (предельный) нагар был заметно выше зоны кольцевого обугливания стволов. Особенно контрастные различия между кольцевым и односторонним нагаром регистрировались на участке со слабым огнем (в 3–4 раза). В зоне действия сильного огня различия между предельным и кольцевым нагаром менее выражены. Прослеживалась тенденция зависимости высоты нагара от диаметра деревьев. На толстых деревьях, особенно в зоне действия слабого и среднего огня, нагар был выше, чем на тонких. Это обстоятельство обусловлено увеличенным количеством опада под крупными деревьями, а также более сильными завихрениями пламени.

Аномальный отпад деревьев, вызванный непосредственными огневыми травмами, отчетливо наблюдался на протяжении первых двух лет после выжиганий. Поскольку все деревья на каждом участке после выжиганий пронумерованы и маркированы Т-образными метками точек измерения диаметра ствола, обеспечивалась корректность повторных измерений через 2, 5 и 10 лет после выжиганий. При выжигании слабой и средней силы губительное действие огня проявлялось в основном локально – там, где были зарегистрированы максимальные значения параметров пламени. На участке с высокой интенсивностью горения обширная зона поврежденного древостоя образовалась по направлению фронта огня. Когда степень термического воздействия на камбий ствола и ветвей, а также на хвою превышала предел пожароустойчивости деревьев, то уже в первые 2 недели после опытов на нижних мутовках наблюдалось массовое пожелтение хвои. Изменение ее окраски в последующем охватывало расположенные выше ветви. По исследованиям Г.И. Гирс [31], летальное повреждение флоэмных тканей происходит после действия температур свыше 55 °С, а побурение хвои от нагретого воздуха отмечается при 50 °С. Изучены постпирогенные вариации жизнеспособности деревьев [17].

После слабых и средних выжиганий усыхают деревья, которые в нормальных условиях могут существовать примерно на 5 лет дольше. Что же касается сильного выжигания, то на этом участке отпад в большей степени отличается от нормального. Средний диаметр деревьев отпада всего на 23% меньше диаметра среднего дерева всего древостоя. Изменилась и пространственная структура отпада. Он был сконцентрирован в зоне движения фронтальной части огня. Спустя 10 лет на этом участке образовалась реди-на, состоящая из крупных деревьев, диаметр которых был больше среднего по древостою.

Среди деревьев, сохранившихся спустя 10 лет после выжиганий, почти нет таких, жизнеспособность которых была бы заметно нарушена огнем, т.е. в такой степени, когда это может отрицательно отразиться на динамике прироста. В данном случае мы не принимаем во внимание влияние на прирост изменившейся лесной среды, полагая, что микроклимат под пологом и влагообеспеченность корневых систем трансформируются после выжиганий на малой площади не так заметно, как на обширных естественных пожарах. По нашим наблюдениям, проведенным в различные сроки

первого вегетационного периода после опытов, полевая влажность на выжженных участках не отличалась от контроля во всех почвенных горизонтах до 1 м от поверхности. Это можно объяснить отсутствием предпосылок для усиления поверхностного стока при небольших размерах выжженных участков и незначительной крутизне местоположения.

Пирогенные вариации отпада и прироста деревьев на обычных пожарах отличаются от рассмотренной модельной картины. Сообразно выгоревшей площади и интенсивности пожаров расширяются амплитуда и контрастность ценоотических повреждений и других нарушений в лесных экосистемах Забайкалья [12, 17, 20, 30]. Одновременно с огневой деструкцией древесных ценозов сгорает напочвенный покров, а также трансформируется лесорастительная среда [32, 33], усугубляется общий дефицит влаги на выгоревших горных склонах [34–36].

Наиболее полная и длительная картина пирогенных нарушений в лесных экосистемах наблюдалась на ландшафтном пожарище в Центральном Забайкалье. Получены комплексные данные о постпирогенной динамике экологической ситуации и лесорастительной среды [34, 35, 37, 38]. Особенно аномальными оказались нарушения в гидротермическом режиме почв, происходящие после интенсивных пожаров. Эти сведения можно рассматривать оригинальными, так как отмечается лишь небольшое число современных публикаций с результатами исследований гидротермического режима почв бореальных лесов Байкальского и соседних регионов [39–42]. Данные по изменению температурного режима почв на пожарищах, несмотря на их широкое распространение, также очень скудны, кроме того, часто они получены дистанционными методами [41, 42].

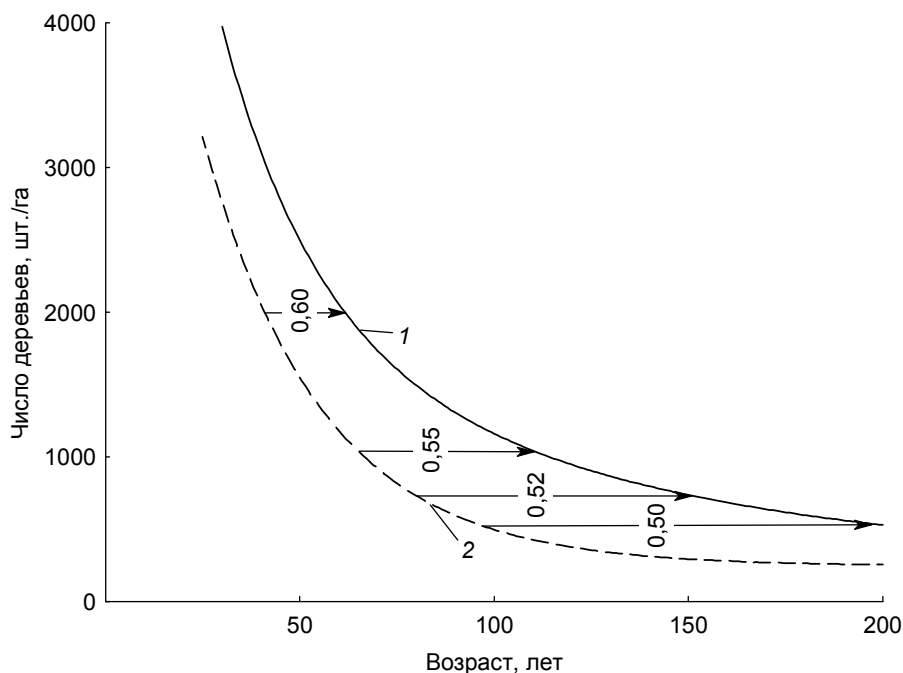
Повышенный нагрев обгоревшей поверхности почвы в дневное время является особенно очевидным при сопоставлении максимальных температур. В жаркие дни первого послепожарного года значения максимальных температур на пожарище превышали контрольный уровень более чем на 20 °C. Через год контраст был вдвое меньше в жаркие дни, а в обычную погоду сокращался до 3–5 °C. Соответственно изменялась температура верхних горизонтов почвы. Даже в течение второго послепожарного сезона (с мая по сентябрь) разность температур между горевшим и контрольным участками на глубине 10 см составляла 3–5 °C. На глубине 50 см она уменьшалась до 2–3 °C.

Деструкция напочвенного покрова, полное уничтожение огнем нижних ярусов фитоценоза негативно отразились на водном режиме почвы. На фоне общего дефицита увлажнения, связанного с засушливостью климата в регионе, запасы влаги на участках с пожаром были систематически снижены по сравнению с контролем. Восстановление нормальной лесной подстилки, согласно наблюдениям за опадомерами, растягивается в подобной ситуации на 15–20 лет.

Ландшафтные пожары в горах часто вызывают необратимые деструктивные процессы, ведущие к разрушению почвы как природного тела. Пожары средней и высокой интенсивности на горных склонах при частичном

или полном сгорании защитного растительного слоя способствуют резкому снижению водопоглотительной способности лесных подстилок и водопроницаемости почв [43]. Это создает условия для формирования поверхностного стока и усиления эрозионных процессов. На свежих пожарищах в зависимости от интенсивности огня поверхностный сток возрастает в 3–15 раз, а твердый – в десятки и сотни раз, что многократно превосходит последствия концентрированных лесозаготовок [44].

Деревья лиственницы находятся в преимущественном положении по отношению к соснам, поскольку они лучше защищены от термических повреждений толстым слоем коры. Кроме того, кроны лиственниц способны к регенерации хвои и побегов, поврежденных пожаром. Однако при интенсивном и экстремальном пирологических режимах в лиственничниках бывают сильные пожары, при повторении которых развивается дигрессия насаждений. Обобщенную схему пирогенной дигрессии лиственничников иллюстрирует рис. 4, где сопоставлена возрастная динамика числа деревьев и полноты древостоев в пирогенных и в ненарушенных насаждениях, относящихся к третьему классу бонитета [29].



**Рис. 4.** Возрастная динамика численности деревьев в нормальных (1) и пирогенных (2) лиственничниках. Стрелками обозначены потенциальные интервалы времени, необходимые для восстановления нормальной полноты и густоты; 0,60...0,50 – относительная полнота древостоев соответственно их возрасту

[Fig. 4. Age dynamics of tree quantity in normal (1) and pyrogenic (2) larch forests. The arrows indicate the potential time intervals necessary for restoration to normal fullness and density; 0.60 ... 0.50 - relative fullness of tree stands, according to their age]

Существенное падение полноты 20–50-летнего древостоя может быть восполнено в течение одного класса возраста (на рис. 4 обозначено стрелками), если сохраняется нормальный темп прироста оставшихся жизнеспособных деревьев, численность которых составляет 2–4 тыс. шт. на 1 га. Временной интервал ( $i$ ) на восстановление нормальной полноты древостоя в общем виде можно определить по формуле

$$i = a_2 - a_1 + \Delta a,$$

где  $a_1$  – возраст, в котором древостой был поврежден пожаром;  $a_2$  – возраст, соответствующий данной густоте или полноте при естественном (беспожарном) изреживании древостоев;  $\Delta a$  – поправка на естественное изреживание пирогенного древостоя в интервале от  $a_1$  до  $a_2$ .

Длительность периодов восстановления полноты увеличивается с возрастом в геометрической прогрессии, поскольку по мере старения древостоев неизбежно снижается их прирост. Для перестойных насаждений анализируемый процесс имеет лишь гипотетическое значение. Более вероятно появление новых поколений там, где почвенно-экологические условия благоприятствуют возобновлению лиственницы, а в иной обстановке – смена пород или образование пустошей. На многолетней мерзлоте пирогенная дигрессия лиственничников в большей степени усугубляется. При вертолетном мониторинге послепожарных мерзлотных лиственничников в середине лета наблюдалось массовое пожелтение хвои. Более того, в местах с прогоранием мощного торфянистого слоя происходил вывал деревьев, что в дальнейшем приводило к появлению ерниковых зарослей.

Известно, что при одинаковой потенциальной пожароопасности отдельных фаций и урочищ фактическая их горимость зависит от многих факторов. Так, на горных склонах наиболее сильный огонь наблюдается при движении снизу вверх. Большую роль в распространении крошки пожаров играют скорость и направление ветра, а также суточная ритмика температуры и влажности воздуха. Огонь ослабевает к концу дня, а ночью едва тлеет. Отсюда следует неравномерность воздействия долговременных ландшафтных пожаров на лесные массивы. Отмеченные вариации используются лесной охраной при выборе тактических решений для остановки и локализации пожаров.

Обширные ландшафтные пожары в светлохвойных лесах оставляют за собой мозаику из участков поврежденных и погибших насаждений в зависимости от вида и интенсивности огневого воздействия. Далее в процессе послепожарного лесовозобновления формируется сложная структура группово- или куртинно-разновозрастных древостоев, периодически модифицируемая повторными пожарами. В соответствии с известной гипотезой об эволюционно обусловленной пиропитности сосны обыкновенной [45–47], подобная структура древостоев определяется механизмом циклически импульсной пирогенной стабильности лесов. При тяжелых поражениях древостоев восстановление их допожарной полноты и запаса растягивается на длительное время, а после повторных пожаров развивается пирогенная дигрессия с катаценозом и неизбежной утратой экологического

значения насаждений. На сухих местоположениях, особенно в подтаежных и подтаежно-лесостепных светлехвойных лесах на крутых южных склонах катаценоз заканчивается локальным обезлесением.

В лесах подтаежно-лесостепного ВПК пожары слабой и средней интенсивности обычно оказывают слабое влияние на состав и структуру гемибореальных лесов, но отрицательно сказываются на их продуктивности [8, 48]. После таких пожаров происходит умеренное изреживание древостоев, ксерофитизация и остепнение подчиненных ярусов (кустарникового и травяного), нередко снижается бонитет. После пожаров высокой интенсивности лесной фитоценоз сменяется степным. Лесовосстановление растягивается на длительный период, исчисляемый многими десятками лет [46].

В светлехвойном таежном ВПК интенсивность пожара во многом зависит от состояния ЛГМ, т.е. от погодных условий, предшествующих пожару. Запасы ЛГМ в таежных лиственничниках и сосняках обычно значительны вследствие большого межпожарного интервала и замедленного разложения мертвого органического вещества. В засушливые периоды при интенсивном и экстремальном режимах неизбежны пожары средней и высокой интенсивности, которые приводят к гибели значительной части древостоя и подчиненных ярусов растительности, а также к уничтожению органогенных горизонтов почв. Несмотря на то, что сосна и лиственница имеют эволюционные приспособления для выживания от пирогенных воздействий, при прогорании подстилки обычно повреждаются их корни, близкие к поверхности почвы, что приводит к гибели деревьев. Пожары слабой интенсивности, в особенности беглые низовые, обычно не приводят к гибели древостоев. Сукцессии после пожаров разной интенсивности протекают по-разному, а последовательность сукцессионных стадий зависит от фактической нарушенности экосистем. При полном уничтожении фитоценозов огнем на гари развиваются травяные фитоценозы из дерновинных трав (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop., *Calamagrostis lansdorffii* (Link) Trin.), которые в течение длительного времени могут переходить в стадии производных (виды рода *Betula* L., *Populus tremula*) либо коренных древостоев, а также на длительные периоды времени замещаться ерниками (*Betula exilis* Sukaczew, *B. divaricata* Ledeb., *B. fruticosa* Pall.). Пожары слабой интенсивности, как правило, не нарушают естественные сукцессионные процессы. Интенсивные обширные пожары в верхних таежных ВПК приводят к снижению верхней границы лесного пояса в горах. Далее гари, особенно по каменистым склонам, могут зарастать кедровым стлаником [49].

В горно-таежном темнохвойном ВПК пожары бывают сравнительно редко, лишь при длительной засухе. Но зато они почти всегда носят губительный характер, так как отличаются интенсивным горением, а темнохвойные породы лесообразователи (*Abies sibirica*, *Pinus sibirica*, *Picea obovata*) не имеют эволюционно сформировавшихся механизмов для защиты от огня. Поэтому они погибают даже при пожарах умеренной интенсивности. Пирогенная сукцессия в темнохвойных лесах протекает сложно и долго, обычно через луговую (дерновинные злаки и осоки, *Chamaenerion an-*

*gustifolium*) и производную стадии березовых (*Betula pendula*, *B. pubescens* Ehrh.) или осиновых древостоев (*Populus tremula*). На верхней границе леса во влажных климатических фациях темнохвойные леса после пожаров могут замещаться субальпийскими лугами.

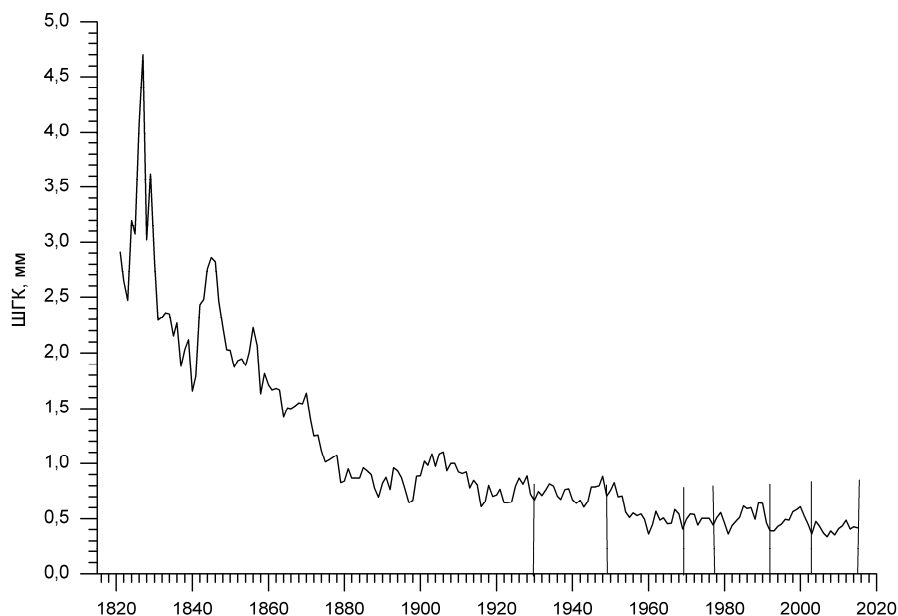
Подгольцовый ВПК потенциально подвержен пожарам сильной интенсивности из-за своеобразия состава и структуры фитоценозов, несмотря на высокое атмосферное увлажнение. Там обычно преобладает кедровый стланик (*Pinus pumila* (Pall.) Regel), значительно реже – кустарниковые березы (*Betula divaricata*, *B. rotundifolia* Spach.). Как кедровый стланик, так и доминанты напочвенного покрова, такие как брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.) и кустистые лишайники родов *Cladonia* P. Browne, *Cetraria* Ach., отличаются интенсивным горением вследствие большой концентрации в фитомассе смолистых веществ (циклических углеводов). Поэтому пожары, возможные там даже в короткие периоды без дождей, приводят, как правило, к полному уничтожению такой растительности. Последующее крайне длительное восстановление растительного покрова протекает преимущественно по схеме первичной сукцессии (на скальных невыветренных породах) [50, 51].

Лесные пожары принято считать мощнейшим дестабилизирующим фактором для лесных экосистем [52, 53]. Вслед за пирогенной деструкцией насаждений неизбежно происходит деградация их защитных функций и развитие эрозионных процессов. Вследствие выгорания подстилки, мохового покрова и органического слоя резко снижаются фильтрационная способность почв и их противоэрозионная устойчивость, разрушается структура почвенных агрегатов, происходит заиливание (лессивирование) почв. В результате внутрипочвенный сток заменяется разрушительным поверхностным, показатели которого могут возрасть на целый порядок [54]. Масштабы пирогенной эрозии бывают более внушительными по сравнению с последствиями сплошных концентрированных рубок леса [20].

Органическое вещество, приносимое водотоками с гарей в Прибайкалье, минерализуется довольно медленно по сравнению с негоревшими участками. Следовательно, пожары увеличивают «грязевый» сток. На склонах возможно развитие эрозионных процессов с суммарной величиной эрозии до 4,5 тыс. т/км<sup>2</sup> [55, 56]. Экспериментально установлено, что противоэрозионная устойчивость почв на гарях в регионе снижается в 15–50 раз. Восстановление данной функции до нормы растягивается на многие десятилетия [57].

Между тем губительные для лесных экосистем Забайкалья ситуации регулярно повторяются, что установлено как по лесопожарной статистике, так и по динамике годовичных колец у деревьев. У старых сосен, произрастающих в долине р. Турка, впадающей в оз. Байкал в средней части восточного берега (светлохвойный таежный ВПК, географическая широта местности ~53° с.ш.), на высоте 1,3 м были взяты образцы для исследования динамики ширины годовичного кольца и построена хронология (рис. 5). Несмотря на то, что местоположение данных деревьев соответствует умеренному действию лимитирующего фактора (атмосферных осадков), об-

щая закономерность снижения радиального прироста в засушливые периоды на дендрограмме полностью воспроизводится. Получена иллюстрация вековой динамики состояний с экстремальной пожароопасностью лесов. Наряду с последними пирогенными аномалиями 2003 и 2015 гг. на графике отчетливо прослеживаются периоды с засушливостью и высокой горимостью лесов в начале 1990-х, во второй половине 1970-х, в середине 1960-х, 1950-х и 1930-х гг. Резкий спад ширины годичного кольца просматривается также на рубеже XIX–XX вв., когда строили Транссиб.



**Рис. 5.** Вековая динамика ширины годичного кольца (ШГК) у сосновых деревьев в долине р. Турка

[Fig. 5. The age-old dynamics of the width of the annual ring (WAR) in pine trees in the Turka River valley]

Лесопирогенная аномалия 2015 г. оказалась исключительно опасной. По данным дистанционного зондирования, она охватила в регионе (без учета территории Монголии) свыше 2 млн га, т.е. более 10% от общей площади. Это многократно превышает эволюционно обусловленную норму [44]. Картина катастрофических последствий ландшафтных пожаров осложнялась торфяными пожарами, действовавшими на обширных участках южного и восточного побережий Байкала. Там происходило полное выгорание корнеобитаемого субстрата вплоть до минерального грунта с последующим вывалом всего древостоя. На этих горях теперь изобилуют хаотические нагромождения обгорелого валежа разных пород деревьев различной степени разложения, часто затопленных грунтовыми водами, что приводит к вторичному заболачиванию, на десятки и сотни лет замедляет восстановление лесного покрова [3, 58].

Приемлемой естественной альтернативой подобным катаклизмам можно рассматривать пожары от гроз. Они возникают в середине лета при частых и обильных атмосферных осадках, поэтому бывают обычно локальными и непродолжительными. Известные лесоэкологи [45] полагают, что номинальный интервал в периодичности интенсивных воздействий низового огня на лесообразовательный процесс в сосняках и лиственничниках зеленомошных составляет около 40 лет.

Нынешняя ситуация с состоянием лесов как основного компонента в природном комплексе Байкала весьма тревожна, что может усугубить загрязнение прибрежных вод, происходящее в его акватории, деградацию почвенного покрова, особенно в горах, вызвать гомогенизацию растительности и снизить углероддепонирующий потенциал региона.

### Заключение

Причинами предрасположенности Забайкалья к возникновению катастрофических ландшафтных пожаров являются специфические природные условия, особенно засушливый климат на большей части территории, наиболее экстремальный в весенне-летний период, с часто повторяющимися сильными ветрами, абсолютное доминирование в низко- и среднегорных лесных массивах пожароопасных типов светлохвойных остепненных насаждений, а также антропогенный фактор – большая часть пожаров возникает при прямом или косвенном воздействии человека.

Влияние и последствия пожаров разной интенсивности зависят от особенностей растительности разных ВПК. В темнохвойно-лесном ВПК пожары приводят к уничтожению коренных темнохвойных древостоев и замене их на длительно производные мелколиственные леса. Лиственничные леса светлохвойно-таежного ВПК на мерзлотных почвах более устойчивы к пирогенному фактору, они восстанавливаются без смены пород, характеризуются интенсивным лесовозобновлением.

Обширные ландшафтные пожары в светлохвойных лесах подтаежно-лесостепного ВПК оставляют за собой насаждения с участками поврежденного и погибшего древостоя. Далее в процессе послепожарного лесовозобновления на гарях среди вариаций уцелевших насаждений (на участках с низовыми пожарами) формируется сложная мозаика группово- или куртинно-разновозрастных древостоев, периодически модифицируемая повторными пожарами. При тяжелых поражениях древостоев и под воздействием повторных пожаров развивается пирогенная дигрессия с катацинозом, остепнением и локальным обезлесением.

После интенсивных пожаров изменяются зольность прогоревшей лесной подстилки и структура содержащихся в почве химических элементов, а также в значительной степени нарушаются физико-химические свойства почв, особенно гидротермический режим, резко возрастает поверхностный (грязевой) сток, увеличиваются масштабы эрозии склоновых почв вследствие уничтожения напочвенного растительного покрова, снижения водо-

проницаемости и водопоглотительной способности почв. Вслед за пирогенной деструкцией лесных экосистем неизбежно происходит деградация защитных функций лесов. Устойчивость почв на горячих снижается, их восстановление растягивается на целые десятилетия. Масштабы пирогенной эрозии бывают более внушительными по сравнению с последствиями концентрированных рубок. Особенно негативными для Байкальского природного комплекса оказались последствия лесопирогенной аномалии 2015 г., охватившей более 10% лесной территории. Грязевый сток с выгоревших площадей может усугубить неблагоприятную ныне экологическую ситуацию на побережье Байкала и в его акватории.

#### Список источников

1. Валендик Э.Н., Кисилыхов Е.К., Рыжкова В.А., Пономарев Е.И., Данилова И.В. Крупные пожары в таежных ландшафтах Центральной Сибири // География и природные ресурсы. 2014. № 1. С. 52–59.
2. Kharuk V.I., Dvinskaya M.L., Petrov I.A., Im S.T., Ranson K.J. Larch forests of Middle Siberia: long-term trends in fire return intervals // Regional Environmental Change. 2016. Vol. 16, No. 8. PP. 2389–2397. doi:10.1007/s10113-016-0964-9
3. Kukavskaya E.A., Buryak L.V., Shvetsov E.G., Conard S.G., Kalenskaya O.P. The impact of increasing fire frequency on forest transformations in southern Siberia // Forest Ecology and Management. 2016. Vol. 382. PP. 225–235. doi: 10.1016/j.foreco.2016.10.015
4. Ponomarev E.I., Kharuk V.I., Ranson K.J. Wildfires dynamics in Siberian larch forests // Forests. 2016. No. 7 (6). PP. 1–9. doi: 10.3390/f7060125
5. Safronov A.N. Effects of Climatic Warming and Wildfires on Recent Vegetation Changes in the Lake Baikal Basin // Climate. 2020. No. 8 (57). PP. 1–25. doi: 10.3390/cli8040057
6. Vasileva A., Moiseenko K. Methane emissions from 2000 to 2011 wildfires in Northeast Eurasia estimated with MODIS burned area data // Atmospheric Environment. 2013. Vol. 71. PP. 115–121. doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.02.001
7. Jolly W.M., Cochrane M.A., Freeborn P.H., Holden Z.A., Brown T.J., Williamson G.J., Bowman D.M. J.S. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013 // Nature Communications. 2015. No. 6 (7537). PP. 1–11. doi: 10.1038/ncomms8537
8. Brazhnik K., Hanley Ch., Shugart H.H. Simulating Changes in Fires and Ecology of the 21<sup>st</sup> Century Eurasian Boreal Forests of Siberia // Forests. 2017. No. 8 (49). PP. 1–27. doi:10.3390/f8020049
9. Курбатский Н.П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии / под ред. Н.П. Курбатского. Красноярск : ИЛИД СО АН СССР, 1970. С. 5–58.
10. Мелехов И. С. Лесная пирология и ее задачи // Современные вопросы охраны лесов от пожаров и борьбы с ними / под ред. И.С. Мелехова. М. : Лесная промышленность, 1965. С. 5–25.
11. Панарин И.И. Леса Прибайкалья. М. : Наука, 1979. 264 с.
12. Побединский А.В. Сосновые леса Средней Сибири и Забайкалья. М. : Наука, 1965. 268 с.
13. Зиганшин Р. А. Послепожарные насаждения экологического профиля Бабушкин-Таежный на Хамар-Дабане // Пожары в лесных экосистемах Сибири. Красноярск : ИЛ СО РАН, 2008. С. 127–130.
14. Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Golyukov A.S., Ranson K.J., Yagunov M.N. Climate-induced mortality of Siberian pine and fir in the Lake Baikal Watershed, Siberia // Forest Ecology and Management. 2017. Vol. 384. PP. 191–199. doi: 10.1016/j.foreco.2016.10.050

15. Евдокименко М.Д. Потенциальная пожароопасность лесов в бассейне оз. Байкал // Лесоведение. 1991. № 5. С. 14–25.
16. Методы изучения лесных сообществ / Е.Н. Андреева и др. ; под ред. В.Т. Ярмишко, И.В. Лянгузовой. СПб. : НИИХимии СПбГУ, 2002. 240 с.
17. Евдокименко М.Д. Жизнеспособность деревьев после низового пожара // Вопросы лесной пирологии / отв. ред. Н.П. Курбатский. Красноярск : Институт леса и древесины СО АН СССР, 1974. С. 167–196.
18. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976. 278 с.
19. Владимиров И.Н., Софронов А.П., Сороковой А.А., Кобылкин Д.В., Фролов А.А. Структура растительного покрова западной части Верхнеангарской котловины // География и природные ресурсы. 2014. № 2. С. 44–53.
20. Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск : Наука, 1986. 226 с.
21. Soil sampling and methods of analysis / ed. by M.R. Carter, E.G. Gregorich. Boca Raton : CRC press. Publ., 2007. 1205 p.
22. IPNI. International Plant Names Index. Kew: The Royal Botanic Gardens. Harvard University Herbaria & Libraries and Australian National Botanic Gardens Publ., 2020. URL: <http://www.ipni.org> (дата обращения: 14.03.2021).
23. Anenkhonov O., Chytry M. Syntaxonomy of vegetation of the Svyatoi nos peninsula, Lake Baikal. 2. Forests and krummholz in comparison with other regions of Northern Buryatia // Folia Geobotanica. 1998. No. 33. PP. 31–75.
24. Ермаков Н.Б. Разнообразие бореальной растительности Северной Азии. Гемибореальные леса. Классификация и ординация. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2003. 232 с.
25. Намзалов Б.Б., Богданова К.М., Бардонова Л.К., Митупов Ч.Ц., Гришкина Т.М., Холбоева С.А., Быков И.П. Бурятия: растительный мир. Вып. II. Улан-Удэ : Изд-во Бурятского государственного университета, 1997. 250 с.
26. Петров К.М., Терехина Н.В. Растительность России и сопредельных стран. СПб. : Химиздат, 2013. 328 с.
27. Карта «Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных территорий». Масштаб 1:7 500 000. (Карта на 2 листах; пояснительный текст и легенда к карте) / под ред. Г.Н. Огуревой. М. : Изд-во ТОО «ЭКОР», 1999.
28. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Специализированные массивы. URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 18.03.2021).
29. Козловский В.Б., Павлов В.М. Ход роста основных лесообразующих пород СССР. М. : Лесная промышленность, 1967. 327 с.
30. Евдокименко М.Д. Роль пирогенного фактора в продуктивности древостоев // Факторы продуктивности леса / отв. ред. И.Н. Елагин. Новосибирск : Наука, 1989. С. 53–90.
31. Гирс Г.И. Физиология ослабленного дерева. Новосибирск : Наука, 1982. 256 с.
32. Barrett K., Baxter R., Kukavskaya E., Balzter H., Shvetsov E., Buryak L. Postfire recruitment failure in Scots pine forests of southern Siberia // Remote Sensing of Environment. 2020. Vol. 237. PP. 1–16. doi: 10.1016/j.rse.2019.111539
33. Holloway J.E., Lewkowicz A.G., Douglas T.A., Li X., Turetsky M.R., Baltzer J.L., Jin H. Impact of wildfire on permafrost landscape: A review of recent advances and future prospects // Permafrost and Periglacial Processes. 2020. Vol. 31, No. 3. PP. 1–12. doi: 10.1002/ppp.2048
34. Евдокименко М.Д. Лесозокологические последствия пожаров в светлохвойных лесах Забайкалья // Экология. 2011. № 3. С. 191–196.
35. Евдокименко М.Д. Пирогенные нарушения гидротермического режима мерзлотных почв в светлохвойных лесах на юго-востоке Сибири // Почвоведение. 2013. № 2. С. 133–143. doi: 10.7868/S0032180X13020044

36. Евдокименко М.Д. Пирогенные нарушения лесорастительной среды в сосняках Забайкалья и их лесоводственные последствия // Лесоведение. 2014. № 1. С. 3–12.
37. Евдокименко М.Д. Микроклимат древостоев и гидротермический режим почв в сосновых лесах Забайкалья после низовых пожаров // Горение и пожары в лесу. Ч. III / отв. ред. В.В. Фуряев. Красноярск : Институт леса и древесины СО АН СССР. 1979. С. 130–140.
38. Евдокименко М.Д. Пирогенные трансформации сосновых лесов в Забайкалье // Лесоведение. 2008. № 4. С. 20–27.
39. Anenkhonov O.A., Korolyuk A.Yu., Sandanov D.V., Liu H., Zverev A.A., Guo D. Soil-moisture conditions indicated by field-layer plants help identify vulnerable forests in the forest-steppe of semi-arid Southern Siberia // Ecological Indicators. 2015. Vol. 57. PP. 196–207. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.04.012
40. Kharuk V.I., Ranson K.J., Oskorbin P.A., Im S.T., Dvinskaya M.L. Climate induced birch mortality in Trans-Baikal lake region, Siberia // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 289. PP. 385–392. doi: 10.1016/j.foreco.2012.10.024
41. Juricka D., Novotna J., Houska J., Parilkova J., Hladky J., Pecina V., Cihlarova H., Burnog M., Elbl J., Rosicka Z., Brtnicky M., Kynicky J. Large-scale permafrost degradation as a primary factor in Larix sibirica forest dieback in the Khentii massif, northern Mongolia // Journal of Forestry Research. 2020. Vol. 31, No. 1. PP. 197–208. doi: 10.1007/s11676-018-0866-4
42. Forkel M., Thonicke K., Beer Ch., Cramer W., Bartalev S., Schmullius Ch. Extreme fire events are related to previous-year surface moisture conditions in permafrost-underlain larch forests of Siberia // Environmental Research Letters. 2012. Vol. 7, No. 4. PP. 1–9. doi: 10.1088/1748-9326/7/4/044021
43. Краснощеков Ю.Н., Евдокименко М.Д., Чередникова Ю.С. Влияние пожаров на экосистемы подтаежно-лесостепных сосновых лесов в Юго-Западном Прибайкалье // Сибирский экологический журнал. 2013. № 5. С. 633–643.
44. Евдокименко М.Д., Краснощеков Ю.Н. Лесозоологические последствия пирогенных аномалий в бассейне озера Байкал // Сибирский лесной журнал. 2017. № 4. С. 66–77. doi: 10.15372/SJFS20170406
45. Санников С.Н., Санникова Н.С. Экология естественного возобновления сосны под пологом леса. М. : Наука, 1985. 149 с.
46. Фуряев В.В., Цветков П.А., Фуряев И.В. Пожароустойчивость сосновых лесов Евразии в экстремальные пожарные сезоны // Хвойные бореальной зоны. 2017. Т. XXXV, № 3–4. С. 68–73.
47. Санников С.Н., Санникова Н.С. Эволюционные аспекты пирозоологии светлохвойных видов // Лесоведение. 2009. № 3. С. 3–10.
48. Park S.-B., Knohl A., Lucas-Moffat A.M., Migliavacca M., Gerbig Ch., Vesala T., Peltonen O., Mammarella I., Kolle O., Lavric J.V., Prokushkin A., Heimann M. Strong radiative effect induced by clouds and smoke on forest net ecosystem productivity in central Siberia // Agricultural and Forest Meteorology. 2018. Vol. 250–251. PP. 376–387. doi: 10.1016/j.agrformet.2017.09.009
49. Zhao F.J., Shu L.F., Wang M.Y., Liu B., Yang L.J. Influencing factors on early vegetation restoration in burned area of Pinus pumila – Larch forest // Acta Ecologica Sinica. 2012. Vol. 32, No. 2. PP. 57–61. doi:10.1016/j.chnaes.2011.12.006
50. Kharuk V.I., Ranson K.J., Dvinskaya M.L. Wildfires dynamic in the larch dominance zone // Geophysical research letters. 2008. Vol. 35, No. 1. PP. 1–6. doi: 10.1029/2007GL032291
51. Krivobokov L.V., Kharukhaeva T.M., Mukhortova L.V. Surface fire impact on the floristic composition and structure of larch forest on permafrost to Western Baikal Region (Eastern Siberia, Russia) // Journal of International Scientific Publications: Ecology and Safety. 2013. Vol. 7 (2). PP. 83–96.
52. Sofronov M.A., Volokitina A.V., Kajimoto T., Matsuura Y., Uemura S. Zonal peculiarities of forest vegetation controlled by fires in Northern Siberia // Eurasian Forest Journal Research. 2000. Vol. 1. PP. 51–57.

53. Sofronov M.A., Volokitina A.V. Wildfire ecology in continuous permafrost zone // Permafrost ecosystems. Ecological studies (Analysis and synthesis) // ed. by A. Osawa, O.A. Zyryanova, Y. Matsuura, T. Kajimoto, R.W. Wein. Dordrecht ; Heidelberg ; London ; New York : Springer, 2010. Vol. 209. PP. 59–82. doi: 10.1007/978-1-4020-9693-8\_4
54. Yevdokimenko M.D. Fire-induced transformations in the productivity of light coniferous stands of the Trans-Baikal region and Mongolia // Fire in ecosystems of boreal Eurasia. Forestry sciences / ed. by J.G. Goldammer, V.V. Furyaev. Dordrecht: Springer, 1996. Vol. 48. PP. 211–218. doi: 10.1007/978-94-015-8737-2\_16
55. Лебедев А.В., Горбатенко В.М., Краснощеков Ю.Н., Решеткова Н.Б., Протопопов Н.В. Средообразующая роль лесов бассейна Байкал. Новосибирск : Наука, 1979. 255 с.
56. Тармаев В.А., Корсунов В.М., Куликов А.И. Линейная эрозия в Байкальском регионе. Улан-Удэ : Изд-во БНЦ СО РАН, 2004. 164 с.
57. Краснощеков Ю.Н. Почвозащитная роль горных лесов бассейна озера Байкал. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004. 223 с.
58. Харук В.И., Пономарев Е.И. Пожары и гари сибирской тайги // Наука из первых рук. 2020. № 2 (87). С. 56–71.

### References

1. Valendik EN, Kisilyakhov EK, Ryzhkova VA, Ponomarev EI, Danilova IV. Conflagration fires in taiga landscapes of Central Siberia. *Geography and Natural Resources*. 2014;35(1):41-47.
2. Kharuk VI, Dvinskaya ML, Petrov IA., Im ST, Ranson KJ. Larch forests of Middle Siberia: long-term trends in fire return intervals. *Regional Environmental Change*. 2016;16(8):2389-2397. doi:10.1007/s10113-016-0964-9
3. Kukavskaya EA, Buryak LV, Shvetsov EG, Conard SG, Kalenskaya OP. The impact of increasing fire frequency on forest transformations in southern Siberia. *Forest Ecology and Management*. 2016;382:225-235. doi:10.1016/j.foreco.2016.10.015
4. Ponomarev EI, Kharuk VI, Ranson KJ. Wildfires dynamics in Siberian larch forests. *Forests*. 2016;7(6):1-9. doi:10.3390/f7060125
5. Safronov AN. Effects of Climatic Warming and Wildfires on Recent Vegetation Changes in the Lake Baikal Basin. *Climate*. 2020; 8(57):1-25. doi:10.3390/cli8040057
6. Vasileva A, Moiseenko K. Methane emissions from 2000 to 2011 wildfires in Northeast Eurasia estimated with MODIS burned area data. *Atmospheric Environment*. 2013; 71:115-121. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.02.001
7. Jolly WM, Cochrane MA, Freeborn PH, Holden ZA, Brown TJ, Williamson GJ, Bowman DMJS. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*. 2015;6(7537):1-11. doi:10.1038/ncomms8537
8. Brazhnik K, Hanley Ch, Shugart HH. Simulating Changes in Fires and Ecology of the 21<sup>st</sup> Century Eurasian Boreal Forests of Siberia. *Forests*. 2017;8(49):1-27. doi: 10.3390/f8020049
9. Kurbatskiy NP. Issledovanie kolichestva i svoystv lesnykh goryuchikh materialov [Study of the quantity and properties of forest combustible materials]. In: *Voprosy lesnoy pirologii* [Issues of forest pyrology]. Kurbatskiy NP, editor. Krasnoyarsk: Institute of forest and wood, the Siberian branch of the USSR Academy of sciences Publ.; 1970. pp. 5-58. In Russian
10. Melekhov IS. Lesnaya pirologiya i ee zadachi [Forest pyrology and its tasks]. In: *Sovremennye voprosy okhrany lesov ot pozharov i bor'by s nimi* [Contemporary issues of forest protection from fires and fighting them]. Melekhov IS, editor. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ.; 1965. pp. 5-25. In Russian
11. Panarin II. Lesa Pribaykal'ya [Forests of Cisbaikalia]. Moscow: Nauka Publ.; 1979. 264 p. In Russian
12. Pobedinskiy AV. Sosnovye lesa Sredney Sibiri i Zabaykal'ya [Pine forests of Central Siberia and Transbaikalia]. Moscow: Nauka Publ.; 1965. 268 p. In Russian

13. Ziganshin RA. Poslepozharnye nasazhdeniya ekologicheskogo profilya Babushkin–Taezhnyy na Khamar Dabane [Post-fire forest stands of the ecological profile Babushkin–Tayozhnyy on Khamar Daban]. In: Пожары в лесных экосистемах Сибири [Fires in forest ecosystems of Siberia]. Krasnoyarsk: Institute of forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ.; 2008. pp. 127-130. In Russian
14. Kharuk VI, Im ST, Petrov IA, Golyukov AS, Ranson KJ, Yagunov MN. Climate-induced mortality of Siberian pine and fir in the Lake Baikal Watershed, Siberia. *Forest Ecology and Management*. 2017;384:191-199. doi:10.1016/j.foreco.2016.10.050
15. Evdokimenko MD. Потенциальная пожароопасность лесов в бассейне оз. Байкал [Potential fire risks of forests in the basin of the lake Baikal]. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*. 1991;5:14-25. In Russian
16. Andreeva EN, Bakkal IYu, Gorshkov VV, Lyanguzova IV, Maznaya EA, Neshataev VYu, Neshataeva VYu, Stavrova NI, Yarmishko VT, Yarmishko MA. Metody izucheniya lesnykh soobshchestv [Methods for studying forest communities]. St. Petersburg: St. Petersburg State University Publ.; 2002. 240 p. In Russian
17. Evdokimenko MD. Zhiznesposobnost' derev'ev posle nizovogo pozhara [Trees vitality after ground fire]. In: *Voprosy lesnoy pirologii* [Issues of forest pyrology]. Kurbatskiy NP, editor. Krasnoyarsk: Institute of forest and wood, the Siberian branch of the USSR Academy of sciences Publ.; 1974. pp. 167-196. In Russian
18. Adler YuP, Markova EV, Granovskiy YuV. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy [Planning an experiment searching for optimal conditions]. Moscow: Nauka Publ.; 1976. 278 p. In Russian
19. Vladimirov IN, Sofronov AP, Sorokovoi AA, Kobylkin DV, Frolov AA. Structure of vegetation cover in the western part of the Upper-Angara depression. *Geography and Natural Resources*. 2014;35(2):143-151.
20. Polikarpov NP, Chebakova NM, Nazimova DI. Klimat i gornye lesa Yuzhnoy Sibiri [Climate and mountain forests of Southern Siberia]. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1986. 226 p. In Russian
21. Soil sampling and methods of analysis. Carter MR, Gregorich EG, editors. Boca Raton: CRC press. Publ.; 2007. 1205 p.
22. IPNI. International Plant Names Index. Kew: The Royal Botanic Gardens, Harvard University Herbaria & Libraries and Australian National Botanic Gardens Publ.; 2020. Available at: <http://www.ipni.org> (accessed: 14.03.2021).
23. Anenkhonov O, Chytry M. Syntaxonomy of vegetation of the Svyatoi nos peninsula, Lake Baikal. 2. Forests and krummholz in comparison with other regions of Northern Buryatia. *Folia Geobotanica*. 1998;33:31-75.
24. Ermakov NB. Raznoobrazie boreal'noy rastitel'nosti Severnoy Azii. Gemiboreal'nye lesa. Klassifikatsiya i ordinatsiya [Diversity of the boreal vegetation of North Asia. Hemiboreal forests. Classification and ordination]. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ.; 2003. 232 p. In Russian
25. Namzalov BB, Bogdanova KM, Bardonova LK, Mitupov ChTs, Grishkina TM, Kholboeva SA, Bykov IP. Buryatiya: rastitel'nyy mir. Vypusk II [Buryatia: flora. Issue 2]. Ulan-Ude: Buryat State University Publ.; 1997. 250 p. In Russian
26. Petrov KM, Terekhina NV. Rastitel'nost' Rossii i sopredel'nykh stran [Vegetation of Russia and neighboring countries]. St. Petersburg: Khimizdat Publ.; 2013. 328 p. In Russian
27. Zony i tipy poynasnosti rastitel'nosti Rossii i sopredel'nykh territoriy [Zones and types of zonality of vegetation in Russia and adjacent territories]. Map. Scale 1:7 500 000. Ogureeva GN, editor. Moscow: EKOR Publ.; 1999. In Russian
28. Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy. Spetsializirovannyye massiv [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. Specialized arrays.]. Available at: <http://meteo.ru/data> (accessed: 18.03.2021).
29. Kozlovskiy VB, Pavlov VM. Khod rosta osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod SSSR [The stand development of the main forest-forming species of the USSR]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ.; 1967. 327 p. In Russian

30. Evdokimenko MD. Rol' pirogennogo faktora v produktivnosti drevostoev [The role of the pyrogenic factor in the productivity of forest stands]. In: Faktory produktivnosti lesa [Forest Productivity Factors]. Elagin IN, editor. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch Publ.; 1989. pp. 53-90. In Russian
31. Girs GI. Fiziologiya oslablennogo dereva [Physiology of a weakened tree]. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch Publ.; 1982. 256 p. In Russian
32. Barrett K, Baxter R, Kukavskaya E, Baltzer H, Shvetsov E, Buryak L. Postfire recruitment failure in Scots pine forests of southern Siberia. *Remote Sensing of Environment*. 2020;237: 1-16. doi:10.1016/j.rse.2019.111539
33. Holloway JE, Lewkowicz AG, Douglas TA, Li X, Turetsky MR, Baltzer JL, Jin H. Impact of wildfire on permafrost landscape: A review of recent advances and future prospects. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2020;31(3):1-12. doi:10.1002/ppp.2048
34. Yevdokimenko MD. Forest-ecological consequences of fires in light conifer forests of Transbaikalia. *Russian Journal of Ecology*. 2011;42(3):205-210.
35. Evdokimenko MD. Pyrogenic disturbances of the hydrothermic regime of cryogenic soils under light coniferous forests in Southeastern Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2013;46(2):117-126. doi:10.1134/S106422931302004X
36. Evdokimenko MD. Pirogennyye narusheniya lesorastitel'noy sredy v sosnyakakh Zabaykal'ya i ikh lesovodstvennyye posledstviya [Fire-induced disturbance of forest growth habitats of pines in Transbaikalia and the consequences for silviculture]. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*. 2014;1:3-12. In Russian, English Summary
37. Evdokimenko MD. Mikroklimat drevostoev i gidrotermicheskiy rezhim pochv v sosnovykh lesakh Zabaykal'ya posle nizovykh pozharov [Microclimate of forest stands and hydrothermal regime of soils in pine forests of Transbaikalia after ground fires]. In: Gorenje i pozhary v lesu. Ch. III. [Combustion and fires in the forest. Part 3]. Furyaev VV, editor. Krasnoyarsk: Institute of forest and wood, the Siberian branch of the USSR Academy of sciences Publ.; 1979. pp. 130-140. In Russian
38. Evdokimenko MD. Pirogennyye transformatsii sosnovykh lesov v Zabaykal'e [Pyrogenic Transformations of Pine Forests in Transbaikalia]. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*. 2008;4:20-27. In Russian, English Summary
39. Anenkhonov OA, Korolyuk AY, Sandanov DV, Liu H, Zverev AA, Guo D. Soil-moisture conditions indicated by field-layer plants help identify vulnerable forests in the forest-steppe of semi-arid Southern Siberia. *Ecological Indicators*. 2015;57:196-207. doi:10.1016/j.ecolind.2015.04.012
40. Kharuk VI, Ranson KJ, Oskorbin PA, Im ST, Dvinskaya ML. Climate induced birch mortality in Trans-Baikal lake region, Siberia. *Forest Ecology and Management*. 2013;289:385-392. doi:10.1016/j.foreco.2012.10.024
41. Juricka D, Novotna J, Houska J, Parilkova J, Hladky J, Pecina V, Cihlarova H, Burnog M, Elbl J, Rosicka Z, Brtnicky M, Kynicky J. Large-scale permafrost degradation as a primary factor in Larix sibirica forest dieback in the Khentii massif, northern Mongolia. *Journal of Forestry Research*. 2020;31(1):197-208. doi:10.1007/s11676-018-0866-4
42. Forkel M, Thonicke K, Beer Ch, Cramer W, Bartalev S, Schmullius Ch. Extreme fire events are related to previous-year surface moisture conditions in permafrost-underlain larch forests of Siberia. *Environmental Research Letters*. 2012;7(4):1-9. doi:10.1088/1748-9326/7/4/044021
43. Krasnoshchekov YN, Evdokimenko MD, Cherednikova YS. Effect of fires on the ecosystems of subtaiga forest-steppe forests in the Southwestern Baikal region. *Contemporary Problems of Ecology*. 2013;20(5):477-485.
44. Evdokimenko MD, Krasnoshchekov YuN. Forest environmental consequences of pyrogenous anomalies in the basin of Baikal lake. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*. 2017;4:66-77. doi:10.15372/SJFS20170406 In Russian, English Summary
45. Sannikov SN, Sannikova NS. Ekologiya estestvennogo vozobnovleniya sosny pod pologom lesa [Ecology of natural regeneration of pine under the forest canopy]. Moscow: Nauka Publ.; 1985. 149 p. In Russian

46. Fryaev VV, Tsvetkov PA, Fryaev IV. Pozharoustoychivost' sosnovykh lesov Evrazii v ekstremal'nye pozhar'nye sezony [Flammability of pine forests of Eurasia in extreme fire seasons]. *Khvoynye boreal'noy zony = Conifers of the boreal area*. 2017;35(3-4):68-73. In Russian, English Summary
47. Sannikov SN, Sannikova NS. Evolyutsionnye aspekty piroekologii svetlokhvoynykh vidov [Evolutionary Aspects of Pyroecology of Light Coniferous Species]. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*. 2009;3:3-10. In Russian, English Summary
48. Park S-B, Knohl A, Lucas-Moffat AM, Migliavacca M, Gerbig Ch, Vesala T, Peltola O, Mammarella I, Kolle O, Lavric JV, Prokushkin A, Heimann M. Strong radiative effect induced by clouds and smoke on forest net ecosystem productivity in central Siberia. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2018;250-251:376-387. doi: 10.1016/j.agrformet.2017.09.009
49. Zhao FJ, Shu LF, Wang MY, Liu B, Yang LJ. Influencing factors on early vegetation restoration in burned area of Pinus pumila – Larch forest. *Acta Ecologica Sinica*. 2012;32(2):57-61. doi:10.1016/j.chnaes.2011.12.006
50. Kharuk VI, Ranson KJ, Dvinskaya ML. Wildfires dynamic in the larch dominance zone. *Geophysical research letters*. 2008;35(1):1-6. doi:10.1029/2007GL032291
51. Krivobokov LV, Kharpukhaeva TM, Mukhortova LV. Surface fire impact on the floristic composition and structure of larch forest on permafrost to Western Baikal Region (Eastern Siberia, Russia). *Journal of International Scientific Publications: Ecology and Safety*. 2013;7(2):83-96.
52. Sofronov MA, Volokitina AV, Kajimoto T, Matsuura Y, Uemura S. Zonal peculiarities of forest vegetation controlled by fires in Northern Siberia. *Eurasian Forest Journal Research*. 2000;1:51-57.
53. Sofronov MA, Volokitina AV. Wildfire ecology in continuous permafrost zone. In: *Permafrost ecosystems. Ecological studies (Analysis and synthesis)*. Vol. 209. Osawa A, Zyryanova OA, Matsuura Y, Kajimoto T, Wein RW, editors. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer; 2010. pp. 59-82. doi:10.1007/978-1-4020-9693-8\_4
54. Yevdokimenko MD. Fire-induced transformations in the productivity of light coniferous stands of the Trans-Baikal region and Mongolia. In: *Fire in ecosystems of boreal Eurasia. Forestry sciences*. Vol. 48. Goldammer JG, Furaev VV, editors. Dordrecht: Springer; 1996. pp. 211-218. doi:10.1007/978-94-015-8737-2\_16
55. Lebedev AV, Gorbatenko VM, Krasnoshchekov YuN, Reshetkova NB, Protopopov NV. Sredobrazuyushchaya rol' lesov basseyna Baykal [Environment-forming role of forests in the Baikal basin]. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1979. 255 p. In Russian
56. Tarmaev VA, Korsunov VM, Kulikov AI. Lineynaya eroziya v Baykal'skom regione [Linear erosion in the Baikal region]. Ulan-Ude: Buryat Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ.; 2004. 164 p. In Russian
57. Krasnoshchekov YuN. Pochvozashchitnaya rol' gornykh lesov basseyna ozera Baykal [Soil protection role of mountain forests in the Baikal basin]. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ.; 2004. 223 p. In Russian
58. Kharuk VI, Ponomarev EI. Wildfires and Burns of Siberian Taiga. *Science First Hand*. 2020;2(87):44-59.

***Информация об авторах:***

**Евдокименко Михаил Данилович** – канд. с.-х. наук, с.н.с. лаборатории лесоведения и почвоведения Института леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (660036, г. Красноярск, Россия, ул. Академгородок, 50/28)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2065-236X>

E-mail: [evdokimenko@ksc.krasn.ru](mailto:evdokimenko@ksc.krasn.ru)

**Кривобоков Леонид Владиленович** – канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории фитоценологии и лесного ресурсоведения Института леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделе-

ния Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (660036, г. Красноярск, Россия, ул. Академгородок, 50/28).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4105-6281>

E-mail: [leo\\_kr@mail.ru](mailto:leo_kr@mail.ru)

**Петренко Алексей Евгеньевич** – канд. биол. наук, н.с. лаборатории лесоведения и почвоведения Института леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (660036, г. Красноярск, Россия, ул. Академгородок, 50/28).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3444-5297>

E-mail: [alcorsci@bk.ru](mailto:alcorsci@bk.ru)

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Information about the authors:**

**Michael D. Evdokimenko**, Cand. Sci. (Agric.), Senior Researcher, Laboratory of Forestry and Soil Science, VN Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 50/28 Akademgorodok, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2065-236X>

E-mail: [evdokimenko@ksc.krasn.ru](mailto:evdokimenko@ksc.krasn.ru)

**Leonid V. Krivobokov**, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Phytocenology and Forest Resources Science, VN Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 50/28 Akademgorodok, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4105-6281>

E-mail: [leo\\_kr@mail.ru](mailto:leo_kr@mail.ru)

**Alexey E. Petrenko**, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Forestry and Soil Science, VN Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 50/28 Akademgorodok, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3444-5297>

E-mail: [alcorsci@bk.ru](mailto:alcorsci@bk.ru)

*The Authors declare no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 15.04.2022;  
одобрена после рецензирования 11.08.2022; принята к публикации 03.10.2022.*

*The article was submitted 15.04.2022;  
approved after reviewing 11.08.2022; accepted for publication 03.10.2022.*