

## Природные пожары в лиственничниках криолитозоны: мониторинг и стратегия борьбы в условиях меняющегося климата

В. И. ХАРУК<sup>1, 2, 3</sup>, Л. В. БУРЯК<sup>1</sup>, М. Л. ДВИНСКАЯ<sup>1, 3</sup>, И. А. ПЕТРОВ<sup>1, 2, 3</sup>, Е. Г. ШВЕЦОВ<sup>1</sup>, А. С. ГОЛЮКОВ<sup>1, 2, 3</sup>

<sup>1</sup>Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН,  
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28  
E-mail: v7sib@mail.ru

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

<sup>3</sup>Томский государственный университет  
634050, Томск, пр. Ленина, 36

Статья поступила 07.03.2024

После доработки 24.03.2024

Принята к печати 26.03.2024

### АННОТАЦИЯ

Изменения климата повлекли возрастание горимости во всем ареале лиственницы (*Larix sibirica*, *L. gmelinii*, *L. cajanderi*). В работе рассматривается гипотеза о роли пожаров как важного природного фактора, способствующего функциональной устойчивости и доминированию лиственничников в криолитозоне. Исследования проводились в ареале лиственницы в криолитозоне. Анализировались спутниковые снимки, данные наземных обследований и дендрохронологических измерений, эколого-климатические переменные. Установлено, что потепление в 21-м столетии повлекло увеличение интенсивности и частоты пожаров, средней и экстремальной (>10,000 га) площади гарей. Максимальные площади и частоты пожаров наблюдаются на севере и юге криолитозоны. Частота и площадь пожаров связаны обратными экспоненциальными зависимостями с осадками, влажностью почв и напочвенного покрова, атмосферной засушливостью, экспоненциально возрастающей с повышением температуры воздуха. В зоне сплошной мерзлоты лиственница успешно возобновляется на гарях (до 500+ тыс./га сеянцев). В зоне островной мерзлоты (южная часть ареала) численность естественного возобновления на 2–3 порядка ниже, и возобновление представлено преимущественно мелколиственными породами. Возрастающая горимость на юге ареала лиственницы способствует трансформации лесных земель в травяно-кустарниковые сообщества. В процессе таяния многолетней мерзлоты высока вероятность сокращения зоны доминирования лиственницы в южной части ее ареала. Валовая первичная продуктивность (GPP) на гарях восстанавливается до предшествующего пожару уровня в течение 3–15 лет, что в сочетании с преимущественно возрастающими трендами GPP указывает на сохранение лиственничниками функции стока углерода несмотря на возрастающую горимость. В условиях возрастающей горимости требуются изменения в стратегии борьбы с пожарами. Необходимо осознать невозможность подавления всех пожаров и экологическую значимость пожаров в лиственничниках криолитозоны, где они представляют важнейший фактор сохранения лиственничников, а также снижают вероятность развития катастрофических пожаров. Важно сфокусировать борьбу с пожарами на территориях с приоритетной социальной, природной и экономической значимостью, контролируя пожары вне указанных территорий методами мониторинга.

**Ключевые слова:** лесные пожары, лиственничники, горимость, пожары в криолитозоне, борьба с лесными пожарами.

© Харук В. И., Буряк Л. В., Двинская М. Л., Петров И. А., Швецов Е. Г., Голюков А. С., 2024

## ВВЕДЕНИЕ

Лесные пожары являются мощным экологическим фактором, влияющим на растительные виды и особенности их взаимодействия, породный состав леса, круговорот питательных веществ и функционирование лесных экосистем [Bowman et al., 2009; Krawchuk et al., 2009; Archibald et al., 2018; McLaughlan et al., 2020]. В последние десятилетия бореальные леса, включая сибирскую тайгу, испытывают возрастающее влияние пожаров [Chapin et al., 2008; Flannigan et al., 2009; de Groot et al., 2013; Kukavskaya et al., 2016; Kharuk et al., 2021]. В экстремальные годы площади пожаров в Сибири превышают 12 млн га. Увеличение горимости наблюдается даже в Сибирской Арктике, где граница возгораний смещается на север, достигая побережья Северного Ледовитого океана в Восточной Сибири [Kharuk et al., 2022]. Основным фактором, влияющим на частоту пожаров в бореальной зоне, является потепление климата, влекущее возрастание вероятности воспламенения лесных горючих материалов и увеличение частоты молниевых разрядов [Veraverbeke et al., 2017; Hessilt et al., 2021; Kharuk et al., 2023].

В условиях возрастающей суровости пожарных режимов экологами рассматривается необходимость адаптации к этому феномену и поиск путей существования социума с возрастающей горимостью лесных территорий [Chapin et al., 2008; Bowman et al., 2009; Flannigan et al., 2009, 2019; Moritz et al., 2014; McLaughlan et al., 2020; Kharuk et al., 2021, 2022]. Растет число исследований, направленных на смену парадигмы борьбы со всеми возникающими пожарами, а также на изучение экологической роли пожаров в поддержании биоразнообразия и функциональной устойчивости лесов [Coogan et al., 2019; Tymstra et al., 2020; Kharuk et al., 2022]. Известно, что тушение всех пожаров приводит к накоплению лесных горючих материалов, что может приводить к развитию катастрофических пожаров. В частности, предлагаются рассматривать природные пожары на ландшафтном уровне как один из инструментов борьбы с мегапожарами, поскольку другие методы неэффективны в масштабе обширных бореальных экосистем [Melvin et al., 2017; Wotton et al., 2017; Tymstra et al., 2020].

Накапливаются знания об экологической значимости лесных пожаров, особенно для пирофитных сообществ, таких как экосистемы с доминированием светлохвойных пород, включая лиственницу [Санников, 1981; McLaughlan et al., 2020; Буряк и др., 2022; Kharuk et al., 2022]. Например, в лесах Северной Америки, сформированных *Larix laricina*, на пройденных пожарами участках обнаружена более высокая динамика растительности по сравнению с не пройденными огнем площадями. На указанных участках популяции древесных пород быстрее обновляются, перенесшие пожар деревья быстрее растут, а мортмасса подвергается более быстрому разложению [Hopkins et al., 2014]. В древостоях, сформированных лиственницей европейской (*Larix decidua*), на пройденных пожарами площадях установлено более успешное возобновление лиственницы в сравнении с незатронутыми пожарами лесными землями [Moris et al., 2017]. Успешное возобновление лиственницы (*Larix sibirica*, *L. gmelinii*) отмечается на гарях в лиственничниках северной тайги в Сибири. При этом на участках с большими межпожарными интервалами (>100 лет) возобновление малочисленно и недостаточно для поддержания доминирования лиственницы [Kharuk et al., 2016, 2021].

В Сибири большинство пожаров происходит в зоне вечной мерзлоты с доминированием лиственницы (*L. sibirica*, *L. gmelinii* и *L. cajanderi*) в составе древесных пород. Лиственничники занимают в зоне вечной мерзлоты территорию площадью более 300 млн га, представляя крупнейшее лесное сообщество России. Лиственница известна как самая холостойкая порода, приспособленная к суровому климату в условиях многолетней мерзлоты. Все виды лиственницы эволюционировали в условиях периодических пожаров, адаптировались к их влиянию и получили преимущества перед неадаптированными к пожарам древесными видами. Недавние исследования показали увеличение прироста лиственницы в ответ на потепление [Hopkins et al., 2014; Moris et al., 2017; Kharuk et al., 2018, 2023]. Вместе с тем рост частоты пожаров в сообществах с преобладанием лиственницы, влекущий уничтожение поселившегося подроста, может нарушить устойчивость лиственницы к воздействию пожаров.

Сообщества с преобладанием лиственницы в криолитозоне представляют крупнейший запас углерода в Евразии. В настоящее время лиственничники криолитозоны, как и леса России в целом, служат стоком углерода, однако в ряде работ отмечается опасность их превращения из стока в источник углерода [Shuman et al., 2011; Xu et al., 2021; Kharuk et al., 2021].

В условиях возрастающей частоты пожаров необходимо (i) расширить и углубить наши знания о горимости лиственничников и взаимосвязи параметров горимости с факторами окружающей среды, (ii) оценить влияние лесных пожаров на устойчивость лиственничников и (iii) адаптировать стратегию борьбы с пожарами в условиях возрастающей горимости. В данной работе выполнен анализ влияния лесных пожаров на лиственничники, произрастающие в криолитозоне Сибири. Мы предполагаем, что природные пожары являются необходимым фактором, обеспечивающим успешное возобновление лиственницы и ее доминирование в зоне сплошной многолетней мерзлоты.

Исследовались следующие аспекты проблемы:

- Какова временная и пространственная динамика гарей, числа и интенсивности пожаров в лиственничниках криолитозоны?
- Каковы зависимости параметров горимости (частоты, интенсивности и площади пожаров) от эколого-климатических переменных?
- Каково воздействие пожаров на рост лиственницы и ее возобновление на гарях?
- Каковы закономерности послепожарной динамики валовой первичной продуктивности (GPP) на гарях?
- Адаптация существующей стратегии борьбы с пожарами к условиям возрастающей горимости лесных территорий.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Анализ горимости в лиственничных лесах, сформированных *Larix sibirica*, *L. gmelinii* и *L. cajanderi*, выполнен для всей площади криолитозоны. Тестовые участки были выбраны в пределах насаждений с преобладанием лиственницы, расположенных в зонах сплошной, прерывистой и островной мерзлоты. Южная часть ареала лиственницы расположена

в зонах прерывистой и островной мерзлоты (рис. 1). В работе использована карта многолетней мерзлоты Национального центра NSIDC (National Snow and Ice Data Center), находящаяся в открытом доступе [Brown et al., 2002]. В зоне сплошной мерзлоты и в Забайкалье леса сформированы *L. sibirica* и *L. gmelinii* (в Забайкалье – с примесью *Pinus sylvestris* L.) (участки 1 и 3 на рис. 1). В южной части Алтая–Саянского региона доминирует *L. sibirica* (участок 2 на рис. 1).

Исследовалась динамика частоты, средней и общей (суммарной) площади пожаров, а также динамика экстремальных ( $>10\,000$  га) пожаров. В работе использованы данные наземных обследований, спутниковые снимки и эколого-климатические переменные.

Среднемесячная температура воздуха, количество осадков и влажность почвы с пространственным разрешением  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  были получены по данным ERA5-Land (2000–2022 гг.; <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land-monthlymeans?tab=overview> (дата обращения: 9 июня 2023 г.) [Hersbach et al., 2018]. В анализе использовались данные для слоев почвы с глубинами 0–7, 7–28 и 28–100 см. Среднемесячные значения индекса атмосферной засухи SPEI получены службой Global Drought Monitor (<https://spei.csic.es/map/maps.html>; по состоянию на 9 июня 2023 г.) за период 2000–2022 гг. Индекс SPEI является мерой содержания влаги в воздухе и определяется как разница между общим количеством осадков и величиной потенциального суммарного испарения. Таким образом, увеличение индекса SPEI указывает на уменьшение засушливости воздуха по определению [Vicente-Serrano et al., 2010]. В анализе мы также использовали измерения аномалий водной массы (Equivalent of Water Thickness Anomalies, EWTA), представляющей собой продукт гравиметрических измерений (в  $\text{см}^{-1}$ ), выполненных спутниками GRACE/GRACE-FO с разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$  [Landerer et al., 2020]. Ежемесячные данные EWTA взяты из базы данных GFZ (<https://podaac-opendap.jpl.nasa.gov/opendap/hygrax/allData/tellus/L3> (по состоянию на 9 июня 2023 г.)) за период 2002–2022 гг.

## Анализ горимости

Информация о пожарах получена из геопространственной базы данных, сформирован-

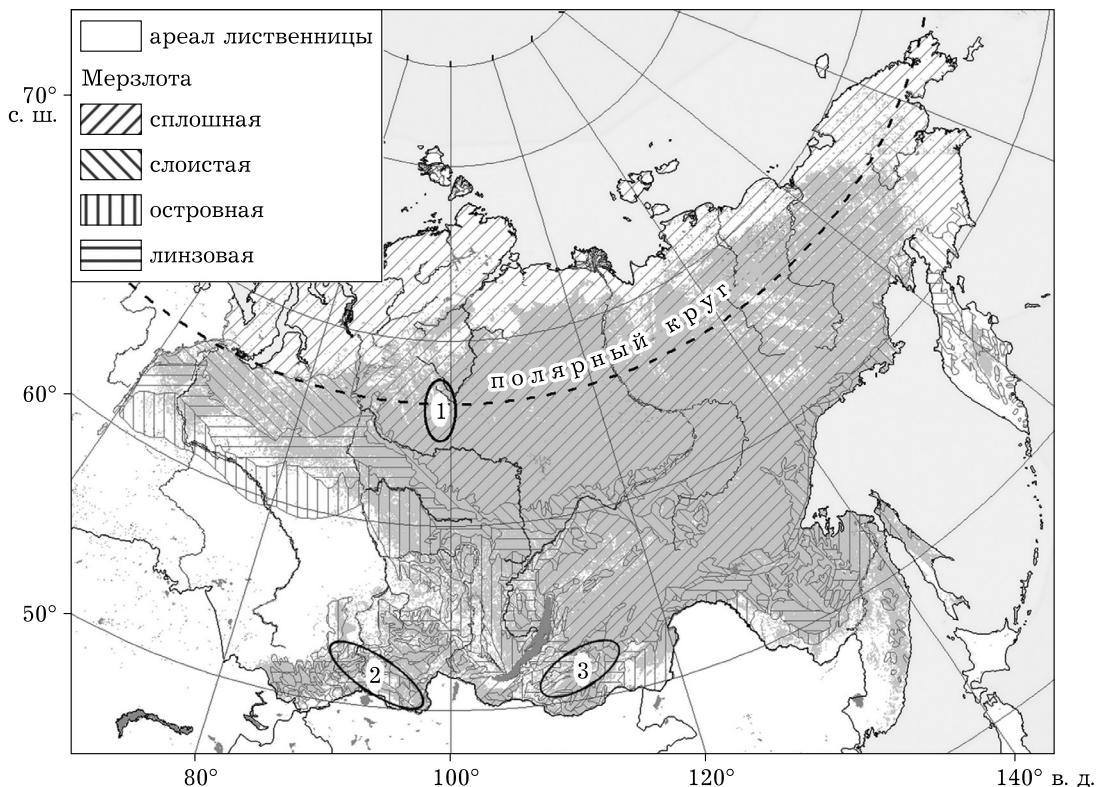


Рис. 1. Ареал лиственницы в криолитозоне и зоны распространения сплошной, слоистой, островной и линзовой мерзлоты (отмечен серым цветом). Районы исследований указаны эллипсами (1 – в зоне сплошной мерзлоты; 2, 3 – в Алтае-Саянском регионе и Забайкалье)

ной в Институте леса СО РАН. В ней собраны данные спутниковых наблюдений пожаров, полученные с платформ NOAA/AVHRR, TERRA/AQUA/MODIS и SNPP/NOAA-20/VIIRS. Данные о мощности тепловыделения пожаров (Fire radiative power, FRP) брались из тематического продукта тепловых аномалий MODIS (MOD14/MYD14) [Giglio et al., 2021]. Продукт содержит данные о координатах, времени обнаружения тепловых аномалий и значениях мощности тепловыделения (в МВт) с пространственным разрешением ~1000 м. Продукты тепловых аномалий были загружены с помощью службы LAADS (Level-1 Atmosphere Archive & Distribution System) (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/> (по состоянию на 11 мая 2023 г.)). Для исключения тепловых аномалий антропогенного происхождения использовались данные по периметрам населенных пунктов из Open Street Map (<https://www.openstreetmap.org/>), т. е. исключались из рассмотрения “пожарные” пиксели, расположенные в границах населенных пунктов. Выявлялись и исключались тепловые аномалии,

связанные с нефтегазовыми месторождениями, по данным высокого разрешения Google Earth. Указанные аномалии располагались преимущественно в северо-западной части региона исследований.

### Дендрохронологический анализ

Для построения древесно-кольцевой хронологии, датировки пожарных событий и расчета межпожарных интервалов (МПИ) использовали 20 образцов (спилов) лиственницы (*L. gmelinii*) со следами пожарных подсушин (координаты центра исследуемой площади 65°20' с. ш./100°37' в. д.). Поверхность каждого спила была отшлифована и обработана контрастным порошком. Ширина годичных колец измерялась с точностью до 0,01 мм на платформе LINTAB-6 [Rinn, Tsap, 1996]. Для датировки пожарных подсушин и построения хронологии МПИ использовалась обобщенная хронология радиального прироста деревьев лиственницы из работы V. I. Kharuk et al. [2016]. Данная хронология использовалась

для определения МПИ методом перекрестной датировки пожарных подсушин. Качество перекрестной датировки оценивалось с помощью программ COFECHA и TSAP [Holmes, 1983]. Ширина годичных колец в миллиметрах была преобразована в безразмерный индекс прироста (ИП). Для снижения влияния низкочастотных возрастных трендов каждый временной ряд годичных колец был стандартизирован с использованием отрицательной экспоненциальной или отрицательной линейной функции в программе ARSTAN [Cook, Holmes, 1986]. Стандартизированная хронология построена как среднее значение индексированных временных рядов радиального прироста. Для построения хронологии МПИ использовалась программа FHAES [Sutherland et al., 2017]. Для оценки отклонений радиального прироста в послепожарный период использовался анализ наложенных эпох (АНЭ; [Fritts, 1976]).

### Оценка успешности возобновления на гарях

Оценивалась успешность послепожарного возобновления лиственницы на гарях, расположенных в центральной (в зоне сплошной мерзлоты, участок № 1 на рис. 1) и в южной (участки № 2 и № 3) частях ареала лиственницы, расположенных в зонах прерывистой, островной и линзовой мерзлоты.

Пробные площади (ПП) располагались на участке размером 0,1 га и радиусом 17,8 м [Лесоустроительная инструкция, 2022]. Определялись координаты ПП, характеристики рельефа, тип почвы. На каждой ПП измерялись все деревья диаметром 4 см и более на высоте груди (1,3 м). Измерения включали породный состав, диаметр и высоту деревьев, наличие повреждений ствола и корней, вызванных пожаром или другими факторами. Описан видовой состав напочвенного покрова (травы, кустарнички, мхи и лишайники). Учет подроста проводился в соответствии с Правилами лесовосстановления [Правила, 2021], т. е. на полигоне закладывалось не менее десяти квадратных ( $2 \times 2$  м или  $1 \times 1$  м) учетных площадок. Учет подроста проводился по пяти высотным группам, м:  $<0,10$ ;  $0,11-0,25$ ;  $0,26-0,50$ ;  $0,51-1,5$  и  $>1,5$ . Подрост разделялся на здоровый, ослабленный и погибший. Подрост считался здоровым, если за

последние три года прирост осевого побега превышал прирост соседних боковых побегов, подрост имел зеленую хвою без механических повреждений, повреждений насекомыми и заболеваниями.

### Динамика GPP (валовая первичная продуктивность)

Для оценки послепожарного восстановления растительности анализировалась временная динамика валовой первичной продуктивности (GPP) на пройденных пожарами участках. Величина GPP была рассчитана на основе восьми дневных композитов с пространственным разрешением 500 м (продукт Terra/MODIS MOD17A3HGF; <https://search.earthdata.nasa.gov> (дата обращения 25 мая 2023)) [Running et al., 2021].

### Статистика

Для оценки степени пирогенной нарушенности использовались такие метрики, как относительное число пожаров (RNF) и относительная площадь, пройденная огнем (RBA), которые рассчитывались следующим образом:

$$RBA = 100 \% \frac{S_{burned}}{S_{larch}}, \quad (1)$$

где  $S_{burned}$  – площадь, пройденная огнем за год, га;  $S_{larch}$  – площадь лиственничных лесов, га;

$$RNF = 10^5 \frac{N_f}{S_{larch}}, \quad (2)$$

где  $N_f$  – число пожаров,  $S_{larch}$  – площадь лиственничных лесов, га.

Расчеты выполнялись в программе MS Excel и ArcGIS (с модулями Python NumPy и SciPy). Для оценки различий в мощности теплоизлучения между группами использовался критерий суммы рангов Уилкоксона. В частности, указанный подход применялся для расчета различий между значениями мощности теплоизлучения в южном и северном широтных поясах Сибири, как будет обсуждаться далее. Для проведения регрессионного анализа применялось программное обеспечение Statsoft Statistica (<https://www.statistica.com> (по состоянию на 9 июня 2023 г.)).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Ареал лиственницы (*Larix sibirica*, *L. gmelinii* и *L. cajanderi*), основной лесообразующей породы России, расположен преимущественно в криолитозоне, где до 80 % лесов сформированы лиственницей на площади свыше 300 млн га. Именно в лиственничниках наблюдается большинство возгораний и пройденных огнем площадей. Лиственничные леса криолитозоны представляют крупнейшую зону стока углерода в Евразии. Вместе с тем возрастающая горимость лесов рассматривается как фактор риска их трансформации в источник атмосферного углерода.

### **Горимость лиственничников в меняющемся климате**

С потеплением климата в лиственничниках, как и в других лесных формациях boreально-зональной зоны, увеличивается частота и площадь пожаров [Bowman et al., 2009; Krawchuk et al., 2009; Archibald et al., 2018; Kharuk et al., 2021]. В Сибири в ареале лиственницы наблюдаются возрастающие тренды средней и суммарной площади гарей, а также пропорции больших ( $S > 200$  га) и экстремальных ( $S > 10\,000$  га) пожаров. Число и площадь экстремальных пожаров за период 2012–2022 гг. возросли по сравнению с периодом 2001–2011 гг. в 2,7 и 3,6 раза соответственно. В экстремальные годы суммарная площадь пройденных пожарами лесных земель превышает 15 млн га. Двукратно возросла и средняя площадь гарей (рис. 2).

Хотя доля экстремальных пожаров не превышает 5 % от их общей численности, они обусловливают до 80 % общей площади гарей (рис. 2, в).

Горимость возрастаает и за пределами полярного круга. Во второй декаде 21-го столетия в арктической лесотундре и тундре троекратно увеличилась площадь гарей вследствие потепления климата, повлекшего удлинение пожароопасного сезона, снижение влажности напочвенного покрова, а также увеличение количества молниевых разрядов. Граница возгораний смещается в направлении к Северному Ледовитому океану, достигнув его побережья в Восточной Сибири [Kharuk et al., 2023].

## **География пожаров**

Крупные и экстремальные по площади гари наблюдаются преимущественно в высоких широтах и в лиственничных редколесьях Забайкалья (рис. 3). При анализе нормированных величин (количество и площади гарей, приведенных на единицу площади лиственничников в данном интервале широт) выявлено, что максимум числа и площади гарей наблюдается в южных широтах (51–55°), снижаясь в северном направлении, тогда как средний размер гарей максимальен в высоких широтах (рис. 4). Географически частота пожаров снижается в северном направлении, тогда как площадь гарей, включая среднюю величину, возрастает, достигая максимальных значений в интервале 60–70° с. ш. Увеличение площади гарей обусловлено как большим запасом горючих материалов, так и фактически отсутствием противопожарных мероприятий. Резкое падение горимости на широтах >70° с. ш. связано с падением инсоляции ниже уровня, обеспечивающего “созревание” горючих материалов.

### **Интенсивность пожаров**

Большая часть пожаров в зоне доминирования лиственницы приходится на низкоинтенсивные низовые пожары. Вместе с тем в южной и, особенно, в северных частях (60–70°) ареала лиственницы наблюдаются пожары высокой интенсивности (рис. 5). Доля экстремальных пожаров достигает 30 % от их общего числа (рис. 6). Высокоинтенсивные пожары на севере наблюдаются преимущественно в последней декаде июля, что обусловлено снижением влажности напочвенного покрова, увеличением продолжительности сезона горимости, а также возрастанием частоты молниевых разрядов вследствие потепления климата [Kharuk et al., 2023]. Важно отметить возрастающий тренд интенсивности пожаров в 21-м столетии (рис. 6, б).

### **Связь горимости с экологово-климатическими переменными**

Число пожаров и площадь гарей, включая экстремальные (>10,000 га), увеличиваются

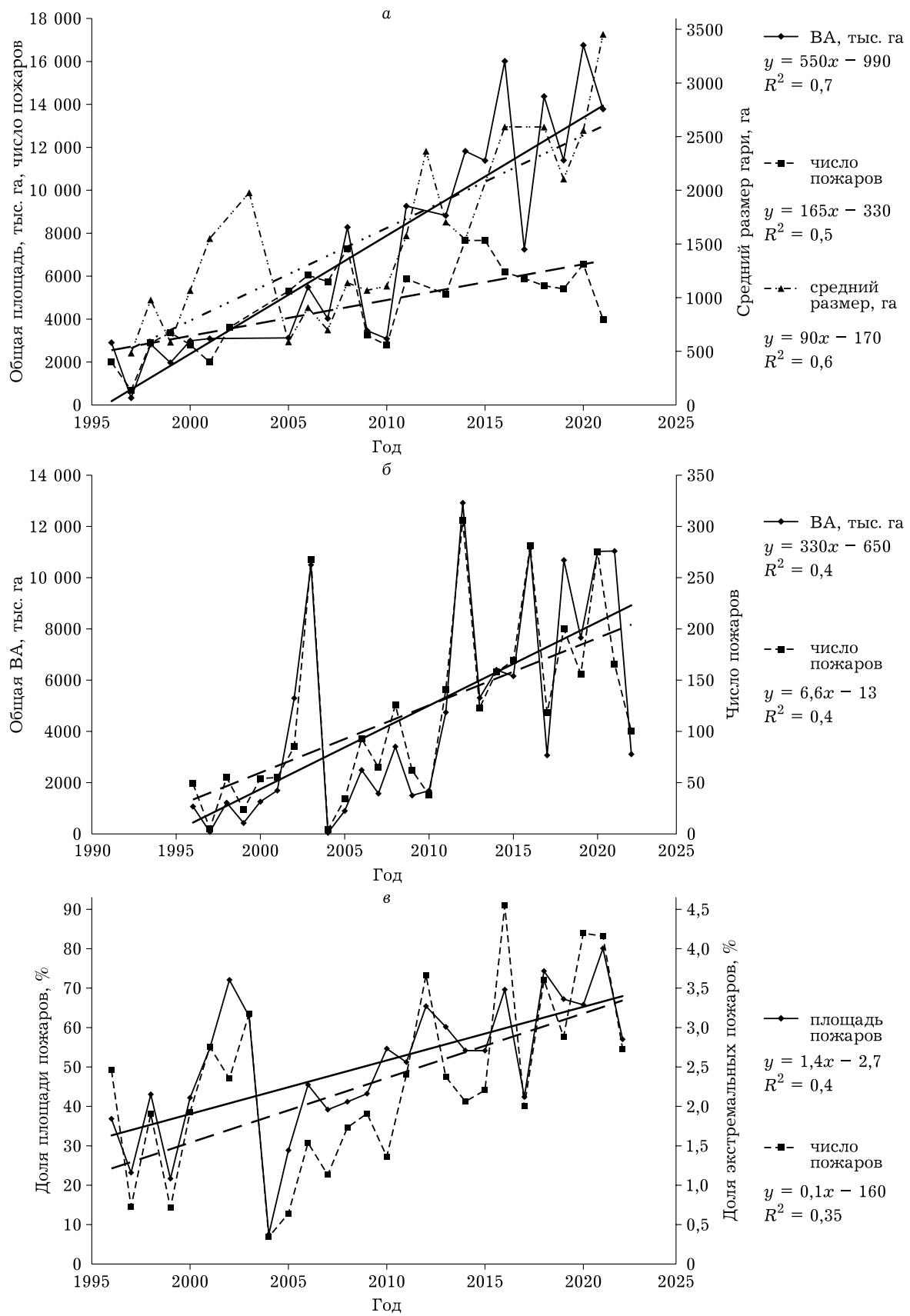


Рис. 2. В ареале лиственницы наблюдаются возрастающие тренды числа пожаров, общей и средней площади гарей (а), а также общей (б) и относительной (в) площади и числа экстремальных пожаров (с площадью гарей  $>10000$  га) ( $p < 0,01$ ). ВА – площадь гарей

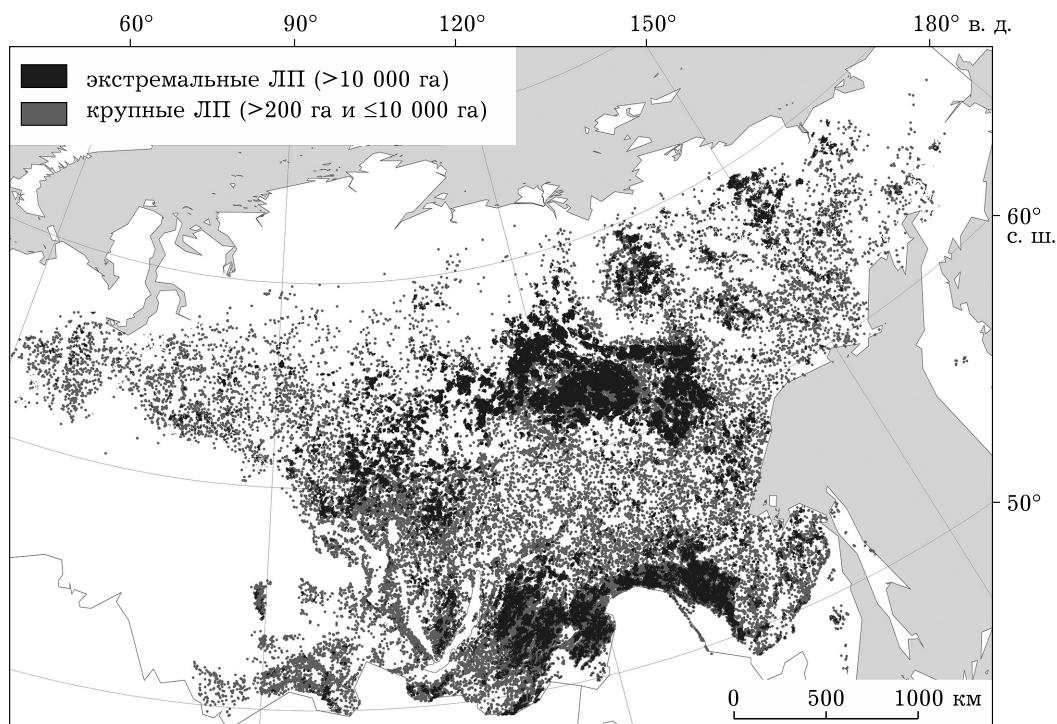


Рис. 3. Распределение крупных ( $200 \text{ га} < \text{площадь гарей} \leq 10\,000 \text{ га}$ ) и экстремальных (с площадью гарей  $> 10\,000 \text{ га}$ ) пожаров в ареале лиственницы. Максимальные площади гарей, обусловленные экстремальными пожарами, наблюдаются преимущественно в высоких широтах (севернее  $60^\circ \text{ с. ш.}$ ) и в Забайкалье

с повышением температуры воздуха и уменьшаются с возрастанием количества осадков, влажности почвы, напочвенного покрова и индекса атмосферной засухи SPEI (рис. 7).

Вместе с тем основным детерминантами горимости является влажность почвы (включая напочвенный покров) и наличие источника возгораний. Остальные переменные, включая

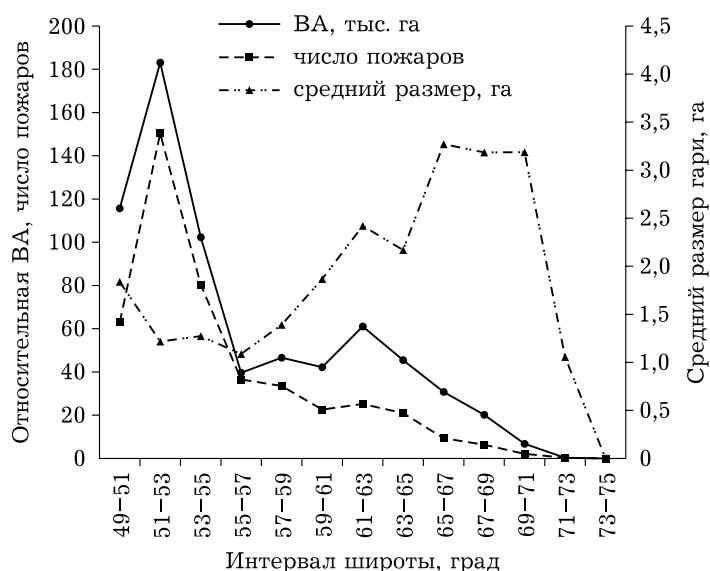


Рис. 4. Распределение по градиенту широты числа и площади гарей (VA), нормированных на площадь лиственничников в данном интервале широт, а также средней площади гарей. Временной интервал – 1996–2022 гг.

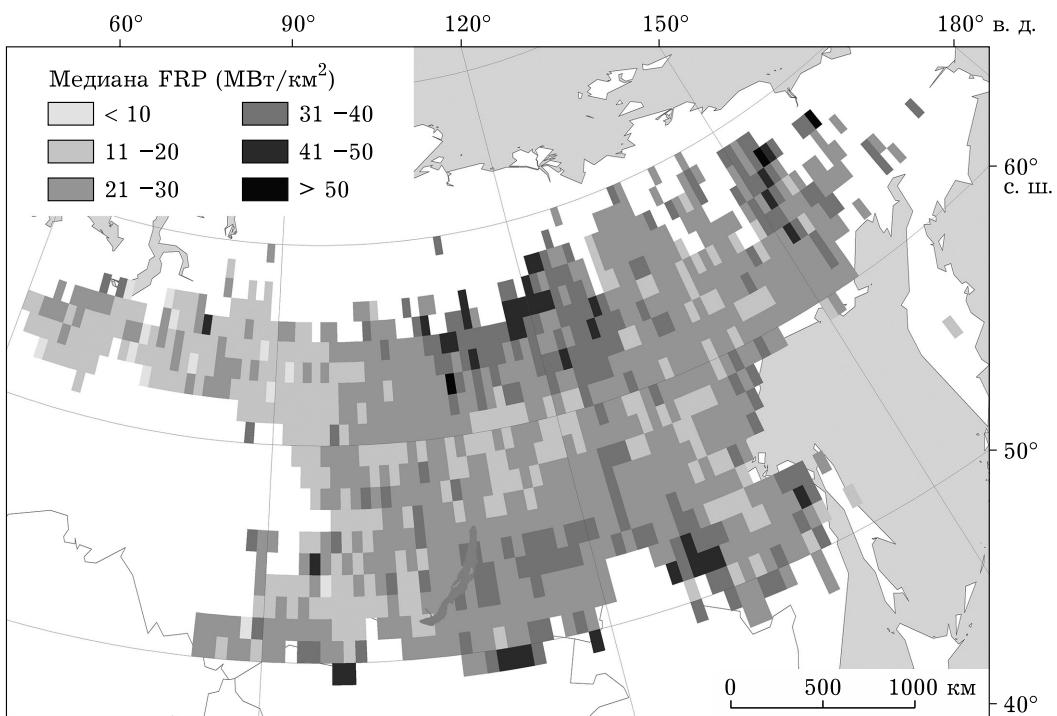


Рис. 5. Пространственное распределение медианных значений радиационной мощности пожаров (FRP – Fire Radiative Power; сетка  $1 \times 1^\circ$ ). Пожары высокой интенсивности наблюдаются в южной и северной частях ареала лиственницы

температуру воздуха, воздействуют на горимость опосредованно, влияя на влажность горючих материалов, их готовность к воспламенению.

Необходимо отметить, что если в северной части ареала лиственницы (зона сплошной мерзлоты) горимость тесно связана с влажностью напочвенного покрова и верхнего гори-

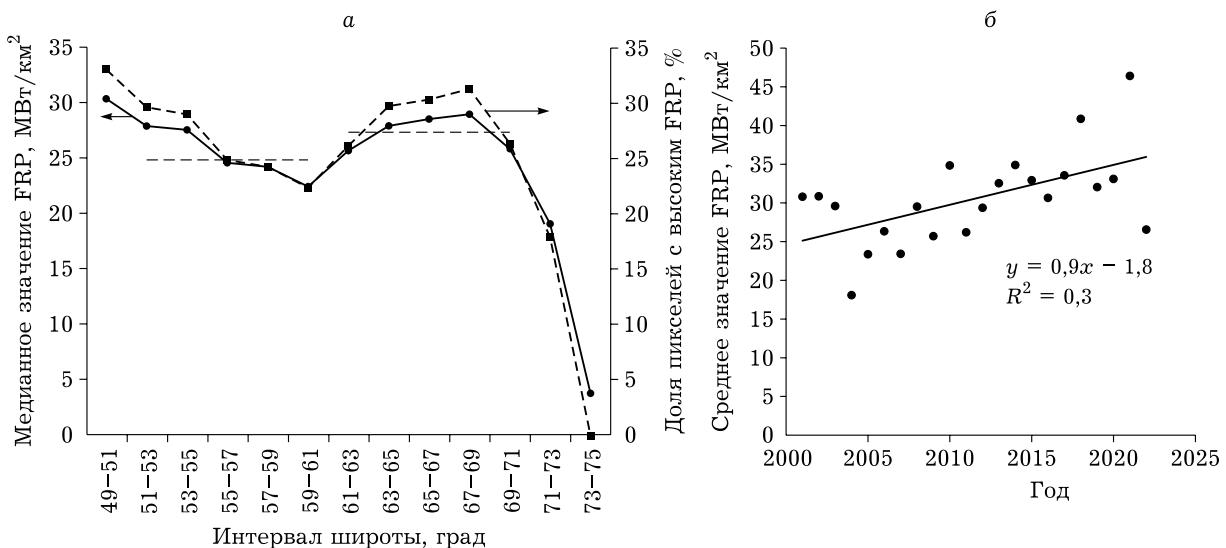


Рис. 6. Медианные величины радиационной мощности пожаров (FRP) и пропорция высокоинтенсивных пожаров ( $FRP \geq 50 \text{ MW}$ ) по градиенту широты (а). FRP значительно выше в интервале  $60-70^\circ$  с. ш. (горизонтальные штриховые линии;  $p < 0,01$ ). Наблюдается возрастающий тренд высокоинтенсивных пожаров ( $p < 0,05$ ) (б)

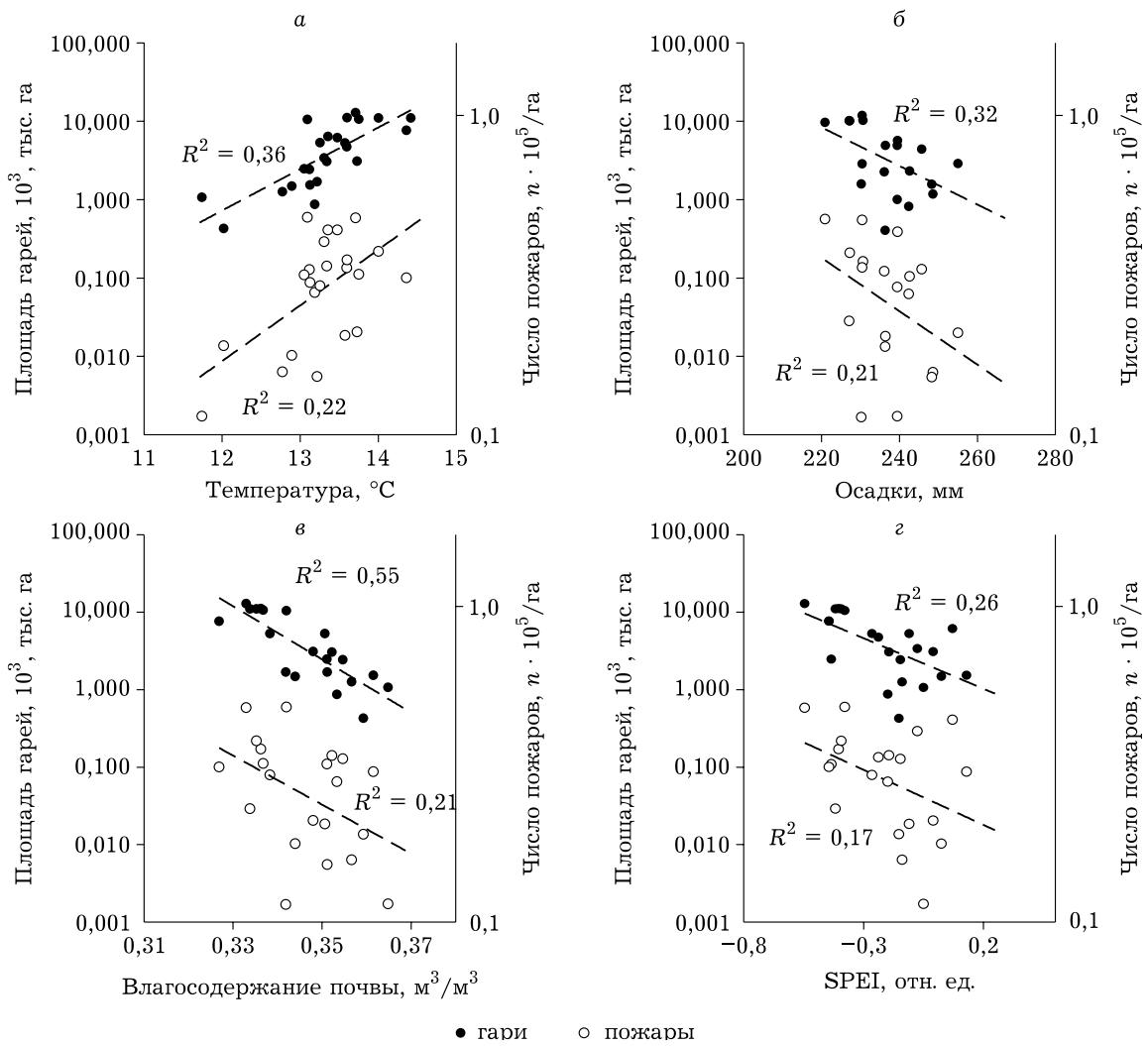


Рис. 7. Площадь экстремальных гарей ( $>10000$  га) и число пожаров связаны экспоненциальными зависимостями с температурой воздуха, осадками, влажностью почвы и индексом атмосферной засухи SPEI. Данные представлены для ареала лиственницы в криолитозоне (2002–2022 гг.). Возрастание величины индекса SPEI соответствует уменьшению атмосферной засухи

зонта почвы (0–7 см), то в более засушливой южной части (прерывистая и спорадическая мерзлота) корреляция с поверхностным слоем падает, однако наблюдается высокая корреляция с более глубокими почвенными горизонтами (7–28, 28–100 см). Последнее объясняется, вероятно, более глубокой корнеобитаемой зоной травяной растительности, преобладающей в южной части ареала лиственницы.

В высоких широтах наряду с влажностью почвы важным фактором горимости являются молниевые разряды – основной источник возгораний в северных регионах [de Groot et al., 2013; Veraverbeke et al., 2017]. Частота молниевых разрядов объясняет 8–12 % вариабельности частоты возгораний в Арктической

зоне Восточной Сибири [Kharuk et al., 2023a]. Прогнозируется дальнейший рост индуцированных грозами пожаров в циркумполярной Арктической зоне Сибири [Hessilt et al., 2021]. Возрастание частоты молний, наряду с “волнами тепла”, влечет продвижение границы горимости в направлении Северного Ледовитого океана [Kharuk et al., 2021]. Хотя глобально с потеплением наблюдается уменьшение частоты молний, в бореальной зоне их частота будет возрастать [Finney et al., 2018; Hessilt et al., 2021]. Наблюдаемые тренды снижения влажности напочвенного покрова и возрастания частоты засушливых периодов в Сибири увеличивают вероятность возгораний от молниевых разрядов. Таким образом, существует

потенциал для дальнейшего возрастания горимости в криолитозоне.

### Периодические пожары и жизненный цикл лиственницы

Лиственница способна выживать после неоднократного воздействия низовых пожаров низкой и средней интенсивности, что прослеживается по пожарным подсушинам на стволах выживших деревьев. На гарях в криолитозоне, как правило, остается мозаика выживших деревьев и их кластеров (рефугиумов), поскольку неоднородности рельефа позволяют деревьям пережить даже высокointенсивные пожары. Такие деревья служат источником семян для возобновления лиственницы. Более того, созревшие семена в погибшем материнском древостое также обеспечивают возобновление лиственницы, выпадая из шишек ранней весной. Ветер и талая вода разносят семена лиственницы по гарям.

С выгоранием напочвенного покрова улучшаются условия для успешного поселения и роста подроста лиственницы. Легкие семена лиственницы не зависают на мохово-лишайниковой подушке, а укореняются в минерализованной пожаром поверхности почвогрунтов. Улучшается дренаж почвы, увеличивается глубина сезонно-тального слоя (до 1,0 м и выше, в зависимости от условий произрастания) и, соответственно, глубина корнеобитаемого слоя. Почва на гарях обогащается биогенными элементами (фосфором, калием, азотом и др.).

С исчезновением верхнего полога улучшается световой режим, что важно для светолюбивой лиственницы. В целом пирогенная мелиорация способствует успешному возобновлению и росту лиственницы на гарях (численность возобновления на участках гарей достигает 500 тыс./га и выше) (рис. 8) [Kharuk et al., 2022]. Однако разрастание термоизолирующего мохово-лишайникового покрова со временем замедляет рост лиственницы вследствие уменьшения глубины корнеобитаемого слоя из-за снижения глубины сезонного оттаивания почвогрунтов.

В зоне несплошной мерзлоты (южная часть криолитозоны) численность возобновления на 2–3 порядка ниже, а естественное возобновление на гарях представлено преимущественно мелколиственными породами. Возрастающая частота пожаров на юге ареала лиственницы способствует трансформации части лиственничников в мелколиственные и травяно-кустарниковые сообщества.

### Валовая первичная продуктивность (GPP) и радиальный прирост лиственницы на гарях

Несмотря на увеличение горимости в криолитозоне, на гарях происходит сравнительно быстрое (в течение 10–15 лет) восстановление величины валовой первичной продуктивности (GPP) (рис. 9). Наряду с этим в криолитозоне, включая Арктику, наблюдается преимущественное возрастание GPP, индуцированное потеплением. В совокупности полученные ре-



Рис. 8. Лиственничники, сформированные *L. gmelini* (а), произрастающие в зоне низкой частоты пожаров (~70 с. ш.; межпожарный интервал ~300 лет). Численность возобновления <200 га. Большинство деревьев перестойные (A = 300 ... 500 + лет). Возобновляющаяся гарь (б). Численность возобновления > 500 000/га. Бассейн р. Эмбечиме

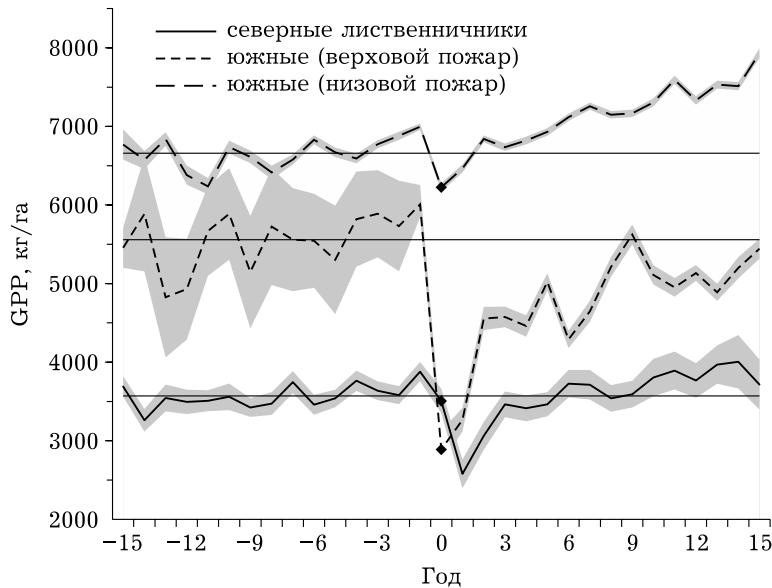


Рис. 9. Динамика валовой первичной продуктивности (GPP) на гарях. Вслед за пожаром (отметка “0” на абсциссе) происходит резкое уменьшение величины GPP, особенно сильное после верхового пожара. В последующем продуктивность достигает предпожарного уровня в течение 3–15 лет в зависимости от типа растительного покрова, типа и интенсивности пожара

зультаты указывают на сохранение лиственничниками Сибири углерод-депонирующей функции [Archibald et al., 2018; McLauchlan et al., 2020; Kharuk et al 2022].

Хотя радиальный прирост лиственницы в зоне вечной мерзлоты определяется преимущественно температурами воздуха, послепожарное ускорение прироста фиксируется даже на фоне сильного похолодания. В течение Малого Ледникового Периода, когда зафиксировано существенное снижение температуры, наблюдается резкое возрастание радиального прироста переживших пожар деревьев (рис. 10). Подобный скачок радиального прироста вызван снижением межвидовой конкуренции, улучшением теплового режима, возрастанием запаса питательных веществ и расширением корнеобитаемой зоны за счет таяния вечной мерзлоты.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Лиственница, являясь пирофитом, извлекает конкурентные преимущества в росте и естественном возобновлении в сравнении с не адаптированными к воздействию пожаров древесными видами. В течение всего голоцена и ранее периодические пожары способствовали поддержанию биологической

устойчивости лиственничников и сохранению биоразнообразия в лиственничных фитоценозах, представляя необходимое условие доминирования лиственницы в криолитозоне. Известно, что полное исключение пожаров в лиственничках, а также в ряде других типов леса влечет вырождение древостоев, ухудшение их воспроизводства и омоложения, а также способствует накоплению лесных горючих материалов в виде опада, мхов, лишайников, валежа и сухостоя, что увеличивает вероятность возникновения катастрофических пожаров [Chapin et al., 2008; Bowman et al., 2009; Flannigan et al., 2019]. В целом периодические природные пожары представляют важнейший экологический фактор жизненного цикла лиственницы и необходимое условие доминирования лиственницы в криолитозоне [Kharuk et al., 2021–2023].

## Борьба с лесными пожарами в условиях меняющегося климата

В условиях возрастающей и прогнозируемой горимости необходима разработка новой стратегии борьбы с пожарами. Следует осознать, что с продолжающимся потеплением ущерб от пожаров будет возрастать, а возможности тушения всех возникающих пожаров

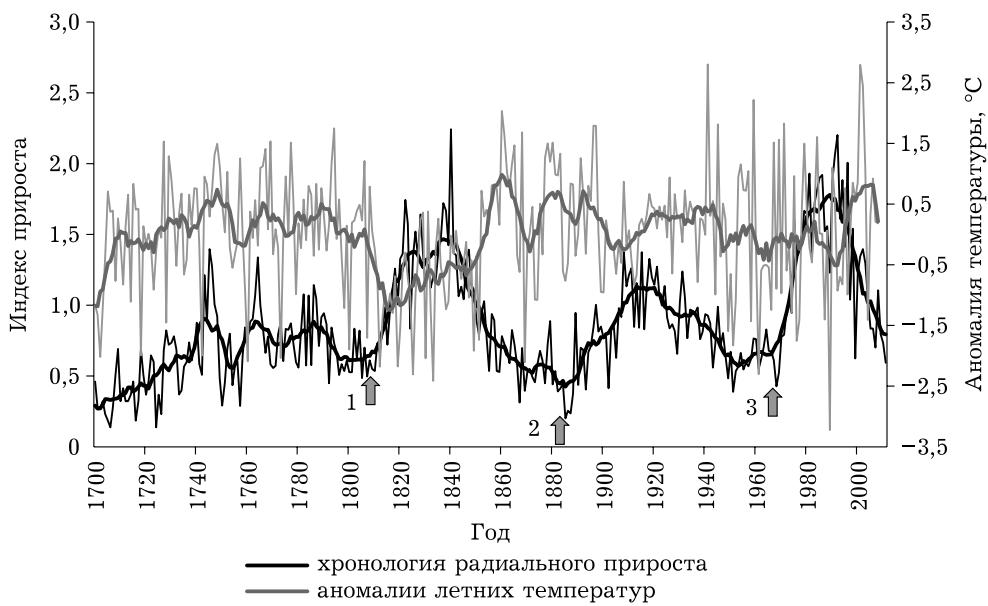


Рис. 10. Сравнительная динамика послепожарного радиального прироста *Larix gmelinii* и аномалий температуры. Стрелками обозначены даты пожаров; толстыми линиями – 11-летние скользящие средние. Последовательное ускорение радиального прироста наблюдается даже на фоне снижения температуры воздуха. Образцы получены в пробных площадях со средними координатами  $65^{\circ}20' \text{ с. ш.}/100^{\circ}37' \text{ в. д.}$  (зона № 1 на рис. 1)

снижаться. Наряду с этим важно учитывать экологическую роль пожаров в лесных фитоценозах, сформированных пирофитными видами древесных растений, поскольку тотальное тушение влечет деградацию древостоев и снижение биоразнообразия в лесных ландшафтах [Chapin et al., 2008; Krawchuk et al., 2009; Archibald et al., 2018].

Следует отметить, что периодические природные пожары представляют часть решения проблемы лесных пожаров, поскольку снижают вероятность катастрофических пожаров, а также содействуют поддержанию и восстановлению лесных экосистем. В этом аспекте природные пожары рассматриваются в качестве необходимого инструмента борьбы с катастрофическими пожарами в криолитозоне, поскольку иные способы (управляемые пожары, удаление горючих материалов) не способны поддерживать и восстанавливать обширные и зависимые от пожаров экосистемы северных лесов [Archibald et al., 2018; Flannigan et al., 2019].

Среди экологов растет понимание важной роли пожаров в поддержании и восстановлении природных экосистем и сохранении в них биоразнообразия [Chapin et al., 2008; Flannigan et al., 2009]. В этой связи предлагается смена

парадигмы: вместо тотальной борьбы со всеми природными пожарами допускать лесные пожары на уровне обширных лесных ландшафтов, контролируя горимость методами мониторинга и прибегая к тушению пожаров в случае угрозы населению и особо охраняемым территориям [Chapin et al., 2008; Flannigan et al., 2019]. Учитывая важную экологическую значимость периодических пожаров для лиственничников криолитозоны, бессмысленно тратить людские и финансовые ресурсы на борьбу со всеми возникающими пожарами. Вместе с тем необходимо совершенствовать методы борьбы с пожарами, включая подготовку квалифицированных кадров, повышение технической оснащенности огнеборцов, создание парка “самолетов – цистерн” и постройку авиабаз для целей лесоохраны. Необходимо сфокусироваться на приоритетной охране территорий с высокой социальной, природной и экономической ценностью, учитывая значимость подверженных опасности лесов, их внедренную стоимость, наличие индустриальной инфраструктуры и населенных пунктов, воздействие задымления на здоровье людей, а также сравнительную стоимость потенциального ущерба и затрат на борьбу с пожарами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменения климата повлекли возрастание горимости во всем ареале лиственницы. Воздрастают частота и интенсивность пожаров, число больших ( $S > 200$  га) и экстремальных ( $S > 10,000$  га) гарей, а также их средняя площадь. В экстремальные сезоны суммарная площадь гарей достигает 15–17 млн га. Частота и интенсивность пожаров связаны экспоненциальными зависимостями с температурой воздуха, индексом атмосферной засухи, осадками, влажностью напочвенного покрова и почв.

Несмотря на увеличение горимости лиственничников криолитозоны, сравнительно быстрое (3–15 лет) восстановление GPP на гарях и преимущественно возрастающие тренды GPP в таежных экосистемах указывают на сохранение лиственничниками Сибири статуса стока углерода.

Лиственница является адаптированным к периодическим пожарам пирофитом, извлекающим конкурентные преимущества в сравнении с неадаптированными древесными видами. Периодические природные пожары представляют важнейший экологический фактор поддержания устойчивости лиственничников, сохранения в них биоразнообразия и доминирования лиственницы в криолитозоне.

Необходимо осознать, что потепление климата повлечет дальнейшее возрастание горимости лесов, усиление задымленности атмосферы и воздействия на здоровье людей, тогда как наши возможности борьбы с огнем будут снижаться. В этой связи требуется изменение стратегии – вместо борьбы со всеми природными пожарами необходимо сфокусировать усилия на территориях с приоритетной социальной, природной и экономической значимостью, контролируя пожары вне указанных территорий методами мониторинга. Необходимо районирование лесных территорий по уровню приоритета борьбы с пожарами. Такой адаптивный подход к борьбе с пожарами в условиях возрастающей горимости лесов пока что не находит должного понимания ни у политиков, ни у общественности. Вместе с тем стратегия тушения пожаров на основе приемлемых рисков возможного ущерба уже реализована в Канаде. Основы указанной стратегии были заложены в системе борьбы с лесными пожарами, разработанной советскими пирологами.

## Вклад авторов

Харук В. И. – концепция; Буряк Л. В., Петров И. А., Швецов Е. Г., Харук В. И. – экспериментальные данные; Буряк Л. В., Петров И. А., Швецов Е. Г., Двинская М. Л., Харук В. И. – обработка и анализ данных; Харук В. И., Швецов Е. Г., Буряк Л. В., Петров И. А. – подготовка текста статьи.

## Финансирование

Работа поддержана программой Томского государственного университета “Приоритет 2030” и Базовым проектом ФИЦ КНЦ № 0287-2021-0008

## Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

## Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Буряк Л. В., Каленская О. П., Кукавская Е. А., Лузганов А. Г. Зонально-географические особенности воздействия пожаров на лесообразование светлохвойных насаждений юга Сибири. Новосибирск: Наука, 2022. 284 с.
- Лесоустроительная инструкция // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Приказ № 510 от 5 августа 2022 года. URL: <https://docs.cntd.ru/document/351878696> (дата обращения: 06.03.2024).
- Правила лесовосстановления // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Приказ № 1024 от 29 декабря 2021 года. URL: <https://docs.cntd.ru/document/728111110> (дата обращения: 06.03.2024).
- Санников С. Н. Лесные пожары как фактор преобразования структуры, возобновления и эволюции биогеоценозов // Экология. 1981. № 6. С. 24–33.
- Archibald S., Lehmann C. E. R., Belcher C. M., Bond W. J., Bradstock R. A., Daniau A. L., Dexter K. G., Forrestel E. J., Greve M., He T., Higgins S. I., Hoffmann W. A., Lamont B. B., McGlenn D. J., Moncrieff G. R., Osborne C. P., Pausas J. G., Price O., Ripley B. S., Rogers B. M., Schwilk D. W., Simon M. F., Turetsky M. R., van der Werf G. R., Zanne A. E. Biological and geophysical feedbacks with fire in the Earth system // Environmen. Res. Lett. 2018. Vol. 13 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9ead>
- Bowman D. M. J. S., Balch J. K., Artaxo P., Bond W. J., Carlson J. M., Cochrane M. A., D'Antonio C. M., DeFries R. S., Doyle J. C., Harrison S. P., Johnston F. H., Keeley J. E., Krawchuk M. A., Kull C. A., Marston J. B., Moritz M. A., Prentice I. C., Roos C. I., Scott A. C., Swetnam T. W., van der Werf G. R., Pyne S. J. Fire in the Earth System // Science. 2009. Vol. 324. P. 481–484. <https://doi.org/10.1126/science.1163886>
- Brown J., Ferrians O. J., Heginbottom J. A., Melnikov E. S. Circum-arctic map of permafrost and ground ice con-

- ditions. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. 2002. Ver. 2. Digital media. Available online: <https://nsidc.org/data/ggd318> (accessed on 24 April 2023).
- Chapin F. S., Trainor S. F., Huntington O., Lovecraft A. L., Zavaleta E., Natcher D. C., McGuire A. D., Nelson J. L., Ray L., Calef M., Fresco N., Huntington H., Rupp T. S., DeWilde L., Naylor R. L. Increasing wildfire in Alaska's boreal forest: Pathways to potential solutions of a wicked problem // *BioScience*. 2008. Vol. 58. P. 531–540. <https://doi.org/10.1641/B580609>
- Coogan S. C. P., Robinne F.-N., Jain P., Flannigan M. D. Scientists' warning on wildfire – a Canadian perspective. // *Can. J. Forest Res.* 2019. Vol. 49. P. 1–9.
- Cook E. R., Holmes R. L. User's Manual for Program AR-STAN. In *Tree-Ring Chronologies of Western North America: California, Eastern Oregon and Northern Great Basin; Chronology Series 6*. Holmes R. L., Adams R. K., Fritts H. C., Eds.; Laboratory of Tree-Ring Research: Tucson, TX, USA, 1986. P. 50–65.
- de Groot W. J., Flannigan M. D., Cantin A. S. Climate change impacts on future boreal fire regimes // *Forest Ecol. Management*. 2013. Vol. 294. P. 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.027>
- Finney D. L., Doherty R. M., Wild O., Stevenson D. S., MacKenzie J. A., Blyth A. M. A projected decrease in lightning under climate change // *Nature Communications*. 2018. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0072-6>
- Flannigan M., Stocks B., Turetsky M., Wotton M. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest // *Global Change Biol.* 2009. Vol. 15. P. 549–560.
- Flannigan M. D. Fighting fire with science // *Nature*. 2019. Vol. 576. P. 328. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-03747-2>
- Fritts H. C. *Tree-rings and climate*. London, New York, San Francisco: Acad. Press, 1976. 576 p.
- Giglio L., Schroeder W., Hall J. V., Justice C. O. MODIS Collection 6 and Collection 6.1 Active Fire Product User's Guide // National Aeronautical and Space Administration – NASA: Washington, DC, USA, 2021. 64 p.
- Hersbach H., Rosnay P., Bell B., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Alonso-Balmaseda M., Balsamo G., Bechtold P. et al. Operational Global Reanalysis: Progress, Future Directions and Synergies with NWP // *ECMWF ERA Rep. Ser.* 2018. Available online: <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/18765-operational-global-reanalysis-progress-future-directions-and-synergies-nwp> (accessed on 19 July 2021).
- Hessilt T. D., van der Werf G., Abatzoglou J. T., Scholten R. C., Veraverbeke S. Future increases in lightning-ignited boreal fires from conjunct increases in dry fuels and lightning // In Proc of the 23rd EGU General Assembly, Online, 19–30 April 2021; *EGU21-2218*. Available online: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU21/EGU21-2218.html> (accessed on 14 June 2023).
- Holmes R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // *Tree-Ring Bull.* 1983. Vol. 44. P. 69–75.
- Hopkins T., Larson A., Belote T. Contrasting Effects of Wildfire and Ecological Restoration in Old-Growth Western Larch Forests // *Forest Sci.* 2014. Vol. 60 (5). P. 1005–1013. <https://doi.org/10.5849/forsci.13-088>
- Kharuk V. I., Dvinskaya M. L., Golyukov A. S., Im S. T., Stalmak A. V. Lightning-Ignited Wildfires beyond the Polar Circle // *Atmosphere*. 2023a. Vol. 14. P. 957. <https://doi.org/10.3390/atmos14060957>
- Kharuk V. I., Dvinskaya M. L., Im S. T., Golyukov A. S., Smith K. T. Wildfires in the Siberian Arctic // *Fire*. 2022. Vol. 5 (4). P. 106. <https://doi.org/10.3390/fire5040106>
- 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 // *Region. Environmental Change*. 2016. Vol. 16(8). P. 2389–2397. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-0964-9>
- Kharuk V. I., Petrov I. A., Golyukov A. S., Dvinskaya M. L., Im S. T., Shushpanov A. S. Larch growth across thermal and moisture gradients in the Siberian Mountains. // *J. Mt. Sci.* 2023. Vol. 20. P. 101–114. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7433-3>
- Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Dvinskaya M. L., Coogan S. C. P., Flannigan M. D. Wildfires in the Siberian taiga // *Ambio*. 2021. Vol. 50. P. 1953–1974. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>
- Kharuk V. I., Ranson K. J., Petrov I. A., Dvinskaya M. L., Im S. T., Golyukov A. S. Larch (*Larix dahurica* Turcz) Growth Response to Climate Change in the Siberian Permafrost Zone // *Reg. Environmental Change*. 2018. Vol. 1 (11). <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1401>
- Krawchuk M. A., Moritz M. A., Parisien M.-A., van Dorn J., Hayhoe K. Global pyrogeography: The current and future distribution of wildfire // *PLoS ONE*. 2009. Vol. 4 (4). P. e5102. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005102>
- 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 Ecol. and Management*. 2016. Vol. 382. P. 222–230. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.015> 0378-1127/2016.
- Landerer F. W., Flechtner F. M., Save H., Webb F. H., Bandikova T., Bertiger W. I., Bettadpur S. V., Byun S. H., Dahle C., Dobslaw H., Fahnestock E., Harvey N., Kang Z., Kruizinga G. L.H., Loomis B. D., McCullough C., Murböck M., Nagel P., Paik M., Pie N., Poole S., Strekalov D., Tamisiea M. E., Wang F., Watkins M. M., Wen H.-Y., Wiese D. N., Yuan D.-N. Extending the global mass change data record: GRACE Follow-On instrument and science data performance // *Geophys. Res. Lett.* 2020. Vol. 47. e2020GL088306. <https://doi.org/10.1029/2020GL088306>
- McLauchlan K. K., Higuera P. E., Miesel J., Rogers B. M., Schweitzer J., Shuman J. K., Tepley A. J., Varner J. M., Veblen T. T., Adalsteinsson S. A., Balch J. K., Baker P., Batllori E., Bigio E., Brando P., Cattau M., Chipman M. L., Coen J., Crandall R., Daniels L., Enright N., Gross W. S., Harvey B. J., Hatten J. A., Hermann S., Hewitt R. E., Kobziar L. N., Landesmann J. B., Loranaty M. M., Maezumi S. Y., Mearns L., Moritz M., Myers J. A., Pausas J. G., Pellegrini A. F. A., Platt W. J., Roozeboom J., Safford H., Santos F., Scheller R. M., Sherriff R. L., Smith K. G., Smith M. D., Watts A. C. Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers. // *J. Ecol.* 2020. Vol. 108. P. 2047–2069. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13403>
- Melvin A. M., Murray J., Boehlert B., Martinich J. A., Rennels L., Rupp T. S. Estimating wildfire response costs in Alaska's changing climate // *Climatic Change*. 2017. Vol. 141. P. 783–795. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1923-2>

- Moris J. V., Vacchiano G., Ascoli D., Motta R. Alternative stable states in mountain forest ecosystems: the case of European larch (*Larix decidua*) forests in the western Alps // *J. Mt. Sci.* 2017. Vol. 14. P. 811–822. <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4328-1>
- Moritz M., Batllori E., Bradstock R., Gill A. M., Handmer J., Hessburg P. F., Leonard J., McCaffrey S., Odion D. C., Schoennagel T., Syphard A. D. Learning to coexist with wildfire // *Nature*. 2014. Vol. 515. P. 58–66. <https://doi.org/10.1038/nature13946>
- Rinn F., Tsap V. 3.6 Reference Manual: Computer Program for Tree-Ring Analysis and Presentation. Frank Rinn Distribution: Heidelberg, Germany, 1996.
- Running S., Mu Q., Zhao M. MODIS/Terra Net Primary Production Gap-Filled Yearly L4 Global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC: Washington, DC, USA, 2021. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A3HGF.061>
- Shuman J. K., Shugart H. H., O'Halloran T. L. Sensitivity of Siberian larch forests to climate change // *Global Change Biol.* 2011. Vol. 17 (7). P. 2370–2384. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02417.x>
- Sutherland E. K., Brewer P. W., Falk D. A., Velásquez M. E. FHAES Fire History Analysis and Exploration System (For FHAES version 2.0.2); Missoula Forestry Sciences Lab: Missoula, USA, 2017.
- Tymstra C., Stocks B., Cai X., Flannigan M. Wildfire management in Canada: Review, challenges and opportunities. // *Prog. Dis. Sci.* 2020. Vol. 5. P. 10004. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100045>
- Veraverbeke S., Rogers B., Goulden M., Jandt R., Miller C., Wiggins E., Randerson J. Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests // *Nat. Climate Change*. 2017. Vol. 7. P. 529–534. <https://doi.org/10.1038/nclimate3329>
- Vicente-Serrano S. M., Beguería S., López-Moreno J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming. The standardized precipitation evapotranspiration index // *J. Clim.* 2010. Vol. 23. P. 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Wotton B. M., Flannigan M. D., Marshall G. A. Potential climate change impacts on fire intensity and key wildfire suppression thresholds in Canada // *Environ. Res. Lett.* 2017. Vol. 12. 095003.
- Xu L., Saatchi S. S., Yang Y., Yu Y., Pongratz J., Bloom A. A., Bowman K., Worden J., Liu J., Yin Y., Domke G., Ronald E., Woodall McR C., Nabuurs G.-J., de-Miguel S., Keller M., Harris N., Maxwell S., Schimel D. Changes in global terrestrial live biomass over the 21st century // *Sci. Adv.* 2021. Vol. 7 (27). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe9829>

# **Natural fires in the larch forest of cryolithozone: monitoring and firefighting strategy in the conditions of changing climate**

V. I. KHARUK<sup>1, 2, 3</sup>, L. V. BURYAK<sup>1</sup>, M. L. DVINSKAYA<sup>1, 3</sup>, I. A. PETROV<sup>1, 2, 3</sup>,  
E. G. SHVETSOV<sup>1</sup>, A. S. GOLYUKOV<sup>1, 2, 3</sup>

<sup>1</sup>*V. N. Sukachev Institute of Forest of SB RAS  
50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Rusia  
E-mail: viharuk@ksc.krasn.ru*

<sup>2</sup>*Siberian Federal University  
79, Svobodny ave, Krasnoyarsk, 660041*

<sup>3</sup>*Tomsk State University  
36, Lenin st., Tomsk, 634050*

Climate changes have led to an increase in fire rates throughout the entire range of larch (*Larix sibirica*, *L. gmelinii*, *L. cajanderi*). We tested the hypothesis that natural fires are an important factor that contributes to the functional stability and dominance of larch forests in the continuous permafrost zone. We included satellite imageries, on-ground surveys data, dendrochronological measurements and eco-climatic variables into analysis. We found that warming in the 21st century has led to an increase in the intensity and frequency of fires, moderate and extreme ( $>10,000$  ha) burnt areas. The maximal burn areas and fire frequency observed in the northern and southern parts of the permafrost zone, respectively. The frequency of fires and burned areas are inverse exponentially dependent on precipitation, soil and ground cover moisture and atmospheric drought, and increase exponentially with air temperature increase. In the zone of continuous permafrost, larch successfully regenerates in burnt areas (up to 500+ thousand/ha of seedlings). In the zone of discontinuous permafrost (southern part of the study area) the number of regeneration is 2–3 orders lower and regeneration represented mainly by hardwood species. The increasing fire frequency in the south of the larch range contributes to the partly transformation of the forested areas into grass and shrub communities. There is a high probability of larch retreat from its southern range during the process of continuous permafrost thawing. Gross primary productivity (GPP) in burned areas quickly (3–15 years) recovers to the pre-fire level. In combination with increasing GPP trends, that indicates carbon- sink role of larch forests increasing fire rate. In conditions of fire rate increase, it necessary to change firefighting strategy. It is necessary to realize (1) the impossibility of the total fires' suppression and (2) the ecological significance of fires in the larch forests in cryolithozone, in which fires are the most important factor of supporting larch forests health and dominance. Alongside with that, periodic natural fires reduce the likelihood of catastrophic fires. It is necessary to focus the firefighting on the areas of the priority social, natural and economic importance, controlling burning outside these areas by monitoring methods.

**Key words:** taiga fires, larch forests, burnt areas, fires in the permafrost zone, fighting forest fires.