

Горимость сосняков Средней Сибири в условиях меняющегося климата

И. А. ПЕТРОВ^{1, 2, 4}, А. С. ШУШПАНОВ^{1, 3, 4}, А. С. ГОЛЮКОВ^{1, 2, 4}, М. Л. ДВИНСКАЯ^{1, 4}, В. И. ХАРУК^{1, 2, 4}

¹Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28
E-mail: petrovilsoran@gmail.com

²Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

³Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева
660037, Красноярск, просп. Красноярский рабочий, 31

⁴Томский государственный университет
634050, Томск, просп. Ленина, 36

Статья поступила 18.08.2022

После доработки 28.08.2022

Принята к печати 28.08.2022

АННОТАЦИЯ

Изменения климата влекут возрастание горимости лесов во всей бореальной зоне. Исследована многолетняя динамика горимости в сосняках Средней Сибири, зависимость частоты возгораний и площади гарей от эколого-климатических переменных, а также послепожарная динамика продуктивности растительного покрова. Методически работа основана на сопряженном анализе результатов наземных обследований, материалов дистанционного зондирования (спектрорадио- и гравиметрическая съемки спутниками Terra/MODIS и GRACE) и дендроэкологических данных. В период с XVIII по XX в. выявлено снижение величины межпожарных интервалов с 33 лет до 20–25 лет. Хотя значимых трендов горимости в текущем столетии не выявлено, во втором его десятилетии наблюдались катастрофические (более 1 млн га) пожары, а также зафиксировано значительное возрастание числа возгораний и площади гарей (в 3,5 и 3,0 раза соответственно). Отмечено, что частота пожаров и площадь гарей тесно связаны с условиями увлажнения и температурным режимом в период, предшествующий возникновению пожара. Вместе с тем величины корреляций параметров горимости с условиями увлажнения (сумма осадков, влажность напочвенного покрова и почвогрунтов, индекс засушливости scPDSI) выше, чем с температурой воздуха. Показано, что определение влажности почвогрунтов методами гравиметрии применимо в оценке риска возникновения лесных пожаров. Установлен высокий уровень корреляции между индексом прироста деревьев сосны и индексами продуктивности растительного покрова (валовая (GPP) и чистая (NPP) продуктивность), генерируемыми по данным дистанционного зондирования. Полученный результат подтверждает применимость указанных индексов в исследованиях динамики продуктивности древостоев. Продуктивность растительного покрова на гарях, а также величина индекса радиального прироста де-

ревьев сосны быстро (в течение примерно десятилетия) восстанавливается до предпожарных величин, что говорит о сохранении северными сосняками углерод-депонирующей функции в условиях меняющегося климата и возрастающей горимости лесов.

Ключевые слова: лесные пожары, гари, горимость сосняков, GPP и NPP на горячах, климат и лесные пожары, гравиметрическая съемка, межпожарные интервалы.

ВВЕДЕНИЕ

Природные и антропогенные пожары представляют важнейший фактор динамики лесных экосистем [Flannigan et al., 2009]. В последние десятилетия в зоне бореальных лесов наблюдается возрастание частоты возгораний и пройденных огнем площадей, обусловленное потеплением климата [Girardin et al., 2009]. Происходит смещение северной границы горимости растительного покрова в направлении Северного Ледовитого океана, где возникновение пожаров уже зафиксировано на океаническом побережье Восточной Сибири [Kharuk et al., 2022]. Наряду с потеплением климата, максимальные значения которого наблюдаются в высоких широтах, повышение горимости обусловлено также аридизацией климата, увеличением частоты и интенсивности засух [Ponomarev et al., 2016; Kitzberger et al., 2017; Coogan et al., 2019; Harvey, Enright, 2022].

В ряде исследований отмечается неоднозначное воздействие пожаров на состояние и послепожарную динамику продуктивности древостоев. Наиболее губительны последствия пожаров в темнохвойных лесах. Горимость темнохвойных лесов значительно ниже светлохвойных, поскольку сформированные пихтой (*Abies sibirica* Ledeb.), сосной кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) и елью (*Picea obovata* Ledeb.) древостои произрастают в условиях более высокого уровня увлажнения. Однако в особо засушливые периоды в темнохвойных лесах возникают пожары, охватывающие сотни тысяч гектар [Барталев и др., 2015; Kharuk et al., 2021]. Вместе с тем полное исключение пожаров из жизненного цикла темнохвойных влечет формирование ослабленных перестойных древостоев, наиболее подверженных воздействию насекомых-вредителей, появлению очагов их массового размножения, гибели древостоев и, как следствие, возникновению катастрофических лесных пожаров [Todd, Jewkes, 2006; Mekonnen et al., 2019]. Повреждение древостоев вследствие вспышек массового размножения насекомых (например, сибирского

шелкопряда – *Dendrolimus sibiricus* Tschetverikov), влекущее накопление горючих материалов, способствует распространению обширных пожаров в очагах усыхания древостоев [Харук, Антамошкина, 2017].

В отличие от темнохвойных, в лиственничниках криолитозоны пожары являются неотъемлемым природным фактором, способствующим успешному возобновлению лиственницы, формированию лиственничников и поддержанию их жизнеспособности [Цветков, 2004; Kharuk et al., 2016, 2021]. В сосняках природные пожары также представляют часть жизненного цикла древостоев, поскольку, как и лиственница, сосна является пиропфитом [Фуряев и др., 2017]. Пожары в сосняках приводят к изменению агрохимических и гидротермических характеристик почвы, способствующему появлению и развитию естественного возобновления, достаточного для формирования древостоя [Иванова и др., 2017].

В исследованиях горимости обширных и труднодоступных северных лесов широкое применение находят дистанционные методы исследования [Kharuk et al., 2016, 2021; Барталев, Стыценко, 2021]. В настоящее время наиболее востребованы материалы съемки спутниками Terra/Aqua MODIS, ежедневно охватывающими всю бореальную зону с приемлемым для широкого спектра пирологических исследований разрешением на местности (~1 км). Указанная съемка позволяет не только выявлять пройденные огнем территории, но и оперативно фиксировать возгорания [Giglio et al., 2018]. В оценке динамики продуктивности растительности на горячах применяются вегетационные индексы (наиболее часто – EVI и NDVI), а также индексы валовой (GPP) и чистой (NPP) первичной продуктивности [Vasilakos et al., 2018; Madani et al., 2021; Kharuk et al., 2022].

Вместе с тем анализ последствий пожаров, а также потребности дешифрирования спутниковой съемки требуют проведения наземных

исследований, среди которых важное значение отводится дендрохронологическим методам, позволяющим формировать хронологии межпожарных интервалов (МПИ) на основе датировки подсушин на стволах деревьев, а также изучать воздействие пожаров на динамику прироста деревьев (см. напр.: [Dieterich, Swetnam, 1984; Margolis et al., 2022]).

Сформированные сосной (*Pinus sylvestris* L.) древостои Средней Сибири, относящиеся к основным лесным формациям, представляют неотъемлемую часть природного ландшафта сибирской тайги, выполняя разнообразные экологические функции, а также являются стоком углерода и источником деловой древесины. Площадь сосновых лесов России оценивается величиной ~120 млн га (второе место после лиственничников).

Цель данной работы – построение долговременной (начиная с 1700-х годов) хронологии горимости сосновых лесов Средней Сибири, анализ зависимости параметров горимости от эколого-климатических переменных, а также динамики послепожарного восстановления продуктивности растительного покрова на гарях. Исследовались следующие аспекты проблемы горимости сосновых древостоев:

1. Временная динамика МПИ в сосняках.

2. Послепожарная динамика продуктивности растительного покрова и радиального прироста деревьев сосны на гарях.

3. Зависимость параметров горимости (частоты возгораний, количества и площади гарей) от температуры воздуха и условий увлажнения в предпожарный период.

Наряду с вышеуказанным, оценивалась применимость спутникового гравиметрического метода определения влажности почвогрунтов в оценке условий возникновения пожаров.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объект исследований. Исследовались основные древостои в подзоне средней и северной тайги Западно-Сибирской равнины. Территория ограничена на западе меридианом 80° в. д., на юге и севере параллелями 59° и 65° с. ш.; восточной границей служит р. Енисей (рис. 1). Общая площадь района исследований составляет ~32 млн га, из которых 8,3 млн га покрыто сосновыми лесами. Помимо сосновых, в районе исследования произрастают также лиственничные и лиственнично-елово-кедровые леса, часто редкостойные и сильно заболоченные; распространены участки островной вечной мерзлоты. Исследования проводились в зеленомошных и лишайниково-зеленомошных сосняках, произрастающих на высотах 80–100 м над ур. м. Средние возраст, высота и диаметр деревьев составляли 170 лет, 20 м и 33 см соответственно.

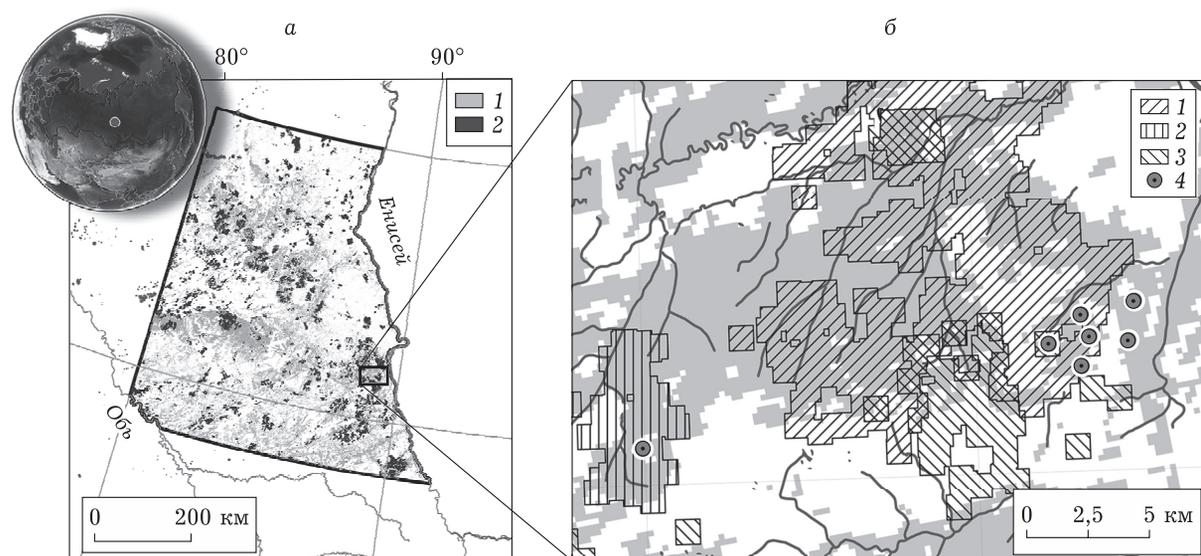


Рис. 1. Картограмма объекта исследования (а: 1 – сосновые древостои; 2 – гарь, возникшие в 2001–2021 гг.). Район проведения полевых работ (б: 1, 2, 3 – гарь, возникшие соответственно в 2006, 2011 и 2018 гг.; 4 – расположение пробных площадей)

Сосновые древостои подвержены периодическим природным и антропогенным пожарам, преимущественно низовым. Климат континентальный, с холодной и снежной зимой и умеренно-теплым влажным летом. Средняя температура января $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$, средняя температура июля около $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Осадки преимущественно летние, за год выпадает 700 мм (на основе данных ERA5-Land; период 1950–2020 гг.) [<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp>].

Полевые исследования проводились в лишайниковых и чернично-зеленомошных сосняках средней тайги приенисейской равнины (высота 70–120 м над ур. м.; см. рис. 1). На временных пробных площадях (ВПП, $N = 7$) выполнялось геопозиционирование, определялись крутизна и экспозиция склонов, породный состав, средние высоты и диаметры деревьев, тип почвы, проводилось краткое геоботаническое описание. Анализ индекса прироста (ИП) и составление хронологии МПИ проводили по образцам древесины (спилы и керны) у деревьев сосны с пожарными подсушинами (живых и отпавших). У деревьев без видимых признаков повреждений буровом Пресслера отбирались керны на высоте груди (1,3 м) в пределах 0,5 га с центром на ВПП.

Датировка пожаров. Для датировки пожаров отобрано 346 образцов (кернов и спилов) древесины деревьев *Pinus sylvestris*. Для каждой ВПП была построена мастер-хронология по образцам древесины, взятым у деревьев без видимых пожарных повреждений (количество кернов 213). Для построения хронологии МПИ использовались 133 образца древесины, взятых у живых и сухих деревьев с пожарными подсушинами.

Поверхность каждого образца подрезалась и обрабатывалась контрастирующим порошком. Ширина годичных колец измерялась с точностью 0,01 мм на платформе LINTAB-6. Возраст деревьев определялся на основе подсчета годичных колец. Величина МПИ рассчитывалась на основе перекрестной датировки пожарных подсушин с мастер-хронологиями. Качество датировки оценивалось с использованием программного обеспечения COFESHA и TSAP [Rinn, 1996; Speer, 2010].

Исходные значения ширины годичных колец (в мм) конвертировались в безразмерный индекс прироста индексированием относительно аппроксимирующей кривой, описывающей

возрастные тренды радиального прироста (отрицательная экспоненциальная функция или линейная регрессия с отрицательным наклоном). Индексированные хронологии строились по образцам деревьев, не имевших видимых пожарных повреждений, либо по радиусам, противоположным расположению пожарной подсушины.

Полученные хронологии МПИ с ВПП, находящихся в относительной близости друг от друга (не более 4 км) и с перекрывающимися датами пожаров, объединяли в обобщенную хронологию МПИ. Построение хронологии МПИ и анализ наложенных эпох проводились с помощью программы FNAES (v. 2.0.2).

Данные дистанционного зондирования. В работе использованы материалы спектрорадиометрической съемки системой Terra/MODIS и гравиметрической съемки спутниками серии GRACE. Анализ горимости сосняков выполнялся по данным продукта MCD64A1, полученным на основе обработки данных Terra/MODIS [<http://fuoco.geog.umd.edu/>]. Продукт представляет собой векторные полигоны, содержащие ежемесячную информацию о гаях с пространственным разрешением 500 м, охватывающий период 2001–2021 гг. Картограммы пространственно-временного распределения гаях генерировались для каждого года (2001–2021). Сосновые древостои на картограммах выделялись по растровым данным о породном составе лесов России VEGA-PRO 2010 г. [Барталев и др., 2016]. Далее по картограммам определялись число и площадь гаях. Число возгораний оценивалось по термическим точкам (thermal hotspots) с разрешением на местности 1×1 км (MODIS Collection 6 NRT Hotspot / Active Fire Detections MCD14DL) [Giglio et al., 2003]. Исходное количество термических точек составило 272,8 тыс. В анализ включались термические точки в сосновых лесах и сосновых редколесьях без учета ложных сигналов от населенных пунктов и объектов инфраструктуры. Для анализа отобрано 54,2 тыс. термических точек.

Продуктивность растительного покрова на гаях оценивалась по индексам GPP, NPP и EVI. GPP (Gross Primary Productivity, валовая первичная продуктивность) получена на основе данных продукта MOD17A2H [Running et al., 2015; <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a2hv006/>], представляющих набор

8-дневных композитов значений GPP (кг С/м²) с пространственным разрешением 500 м [<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb>]. Среднегодовые данные NPP (Net Primary Productivity, чистая первичная продуктивность) с пространственным разрешением 500 м определены из продукта MOD17A3H [<https://www.earthdata.nasa.gov/>]. Вегетационный индекс EVI (Enhanced Vegetation Index), рассматривающийся как дополнительный индикатор продуктивности растительного покрова [Didan, Munoz, 2019], рассчитан на основе данных продукта MOD13Q1, представляющего набор 16-дневных композитов с пространственным разрешением 250 м [<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/>]. Данные по GPP и EVI усреднялись за период с июля по август. Величины GPP, NPP и EVI преобразовывались в многослойный растр, охватывающий период 2001–2021 гг.

Материалы гравиметрической съемки, выполняемой со спутников GRACE, непосредственно отображают аномалии влажности подстилающей поверхности на глубину всего влагосодержащего слоя. Данные представлены среднемесячными аномалиями водного эквивалента массы (АВЭМ) с пространственным разрешением 1° × 1° и охватывают период 2002–2020 гг. [<http://www.grace.jpl.nasa.gov>]. Ранее была показана эффективность гравиметрической съемки в исследованиях влияния условий увлажнения на жизненное состояние древостоев [Yang et al., 2014; Kharuk et al., 2017].

Эколого-климатические переменные.

Анализировалась зависимость горимости сосняков от следующих переменных: среднемесячные температуры и количество осадков, индексы сухости SPEI и scPDSI, влагосодержание почвы, данные гравиметрической съемки (источник: GRACE). Среднемесячные значения температуры и осадков, а также влагосодержания почв (на глубине до 28 см) извлечены из базы данных ERA5-Land [<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp/>; пространственное разрешение 0,1° × 0,1°].

Величины атмосферного увлажнения оценивали по индексам засушливости SPEI и scPDSI. SPEI представляет разницу между величинами осадков и потенциальной эвапотранспирацией [Vicente-Serrano et al., 2010]. Ежемесячные данные SPEI с пространственным разрешением 1° × 1° извлечены из базы

данных [<http://sac.csic.es/spei>]. Индекс засушливости Палмера scPDSI, наряду с данными о температуре, осадках и потенциальной эвапотранспирации, учитывает также характеристики почв и напочвенного покрова и рассчитывается по формуле

$$\text{scPDSI}_i = a \cdot \text{scPDSI}_{i-1} + Z_i/b,$$

где Z – индекс аномалий влажности; a , b – автоматически рассчитываемые коэффициенты, учитывающие климатические условия данной местности [Wells et al., 2004]. Ежемесячные значения scPDSI с пространственным разрешением 1° × 1° содержатся в базе данных CRU [<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/drought/database/>].

Материалы гравиметрической съемки (спутники серии GRACE) непосредственно отображают аномалии водного эквивалента массы (АВЭМ; единица измерения – см). По сути АВЭМ представляют аномалии влажности подстилающей поверхности на глубину всего влагосодержащего слоя почвогрунтов (далее вместо АВЭМ используется термин “аномалии влажности почвогрунтов”). Данные представлены среднемесячными величинами с пространственным разрешением 1° × 1°, охватывающими период 2002–2020 гг. [<http://www.grace.jpl.nasa.gov>].

Статистический анализ. Анализ связи горимости с эколого-климатическими переменными выполнялся с использованием программного обеспечения ArcGIS. Поскольку временные ряды частоты возгораний, количества и площадей гарей имеют ненормальное распределение, использовались непараметрические статистические показатели (коэффициент корреляции Спирмана).

Оценка значимости отклонений эколого-климатических переменных в год пожара и предшествующий ему период проводилась методом анализа наложенных эпох (АНЭ) [Fritts, 1976]. В АНЭ использовались 9 пожарных событий (1911, 1919, 1938, 1939, 1953, 1958, 1983, 2006, 2018 гг.), зафиксированных в обобщенных хронологиях МПИ, построенных для всех семи временных пробных площадей (ВПП), поскольку пространственное покрытие пикселей климатических переменных включает все ВПП, а коэффициенты корреляции между переменными на смежных пикселях превышают 0,9.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Динамика эколого-климатических переменных. В исследуемом регионе с середины 1970-х наблюдается возрастающий тренд температуры воздуха на фоне стагнации величины осадков (рис. 2, а, б). Наблюдался небольшой, но значимый тренд снижения величины SPEI (т. е. возрастания засухливости; рис. 2, в). В динамике влажности почв значимых трендов не наблюдалось (рис. 2, г).

Возникновение пожаров: связь с климатическими переменными. В период 2001–

2021 гг. площадь гарей в сосновых древостоях исследуемого региона составила 3,5 млн га (см. рис. 1). Наибольшая горимость зафиксирована в 2012 г., когда количество возгораний и площадь гарей в 70 и 135 раз превышали медианные значения за весь период наблюдений (рис. 3, а). Во второй декаде 21-го столетия число возгораний и площадь гарей возросли в 3,4 и 2,9 раза соответственно. Распределение числа возгораний в пожароопасный период имеет одномодальную форму (рис. 3, б). Площадь гарей, число возгора-

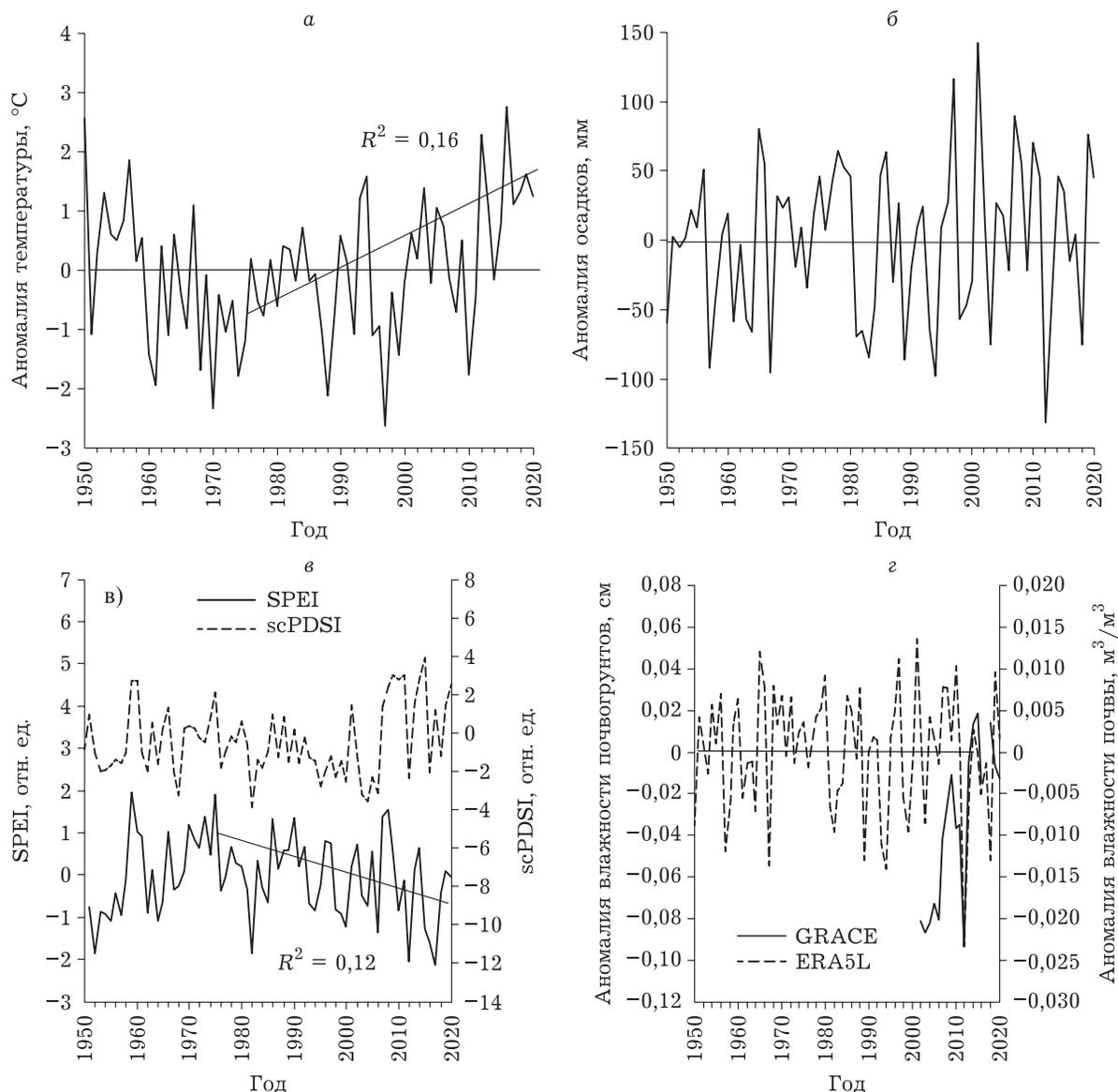


Рис. 2. Временная динамика аномалий среднемесячных температур воздуха (а), суммы (июнь – август) осадков (б), индексов сухости SPEI и scPDSI (в), влажности почв (по данным ERA5L) и почвогрунтов (по данным GRACE) (г). Тренды значимы при $p < 0,05$

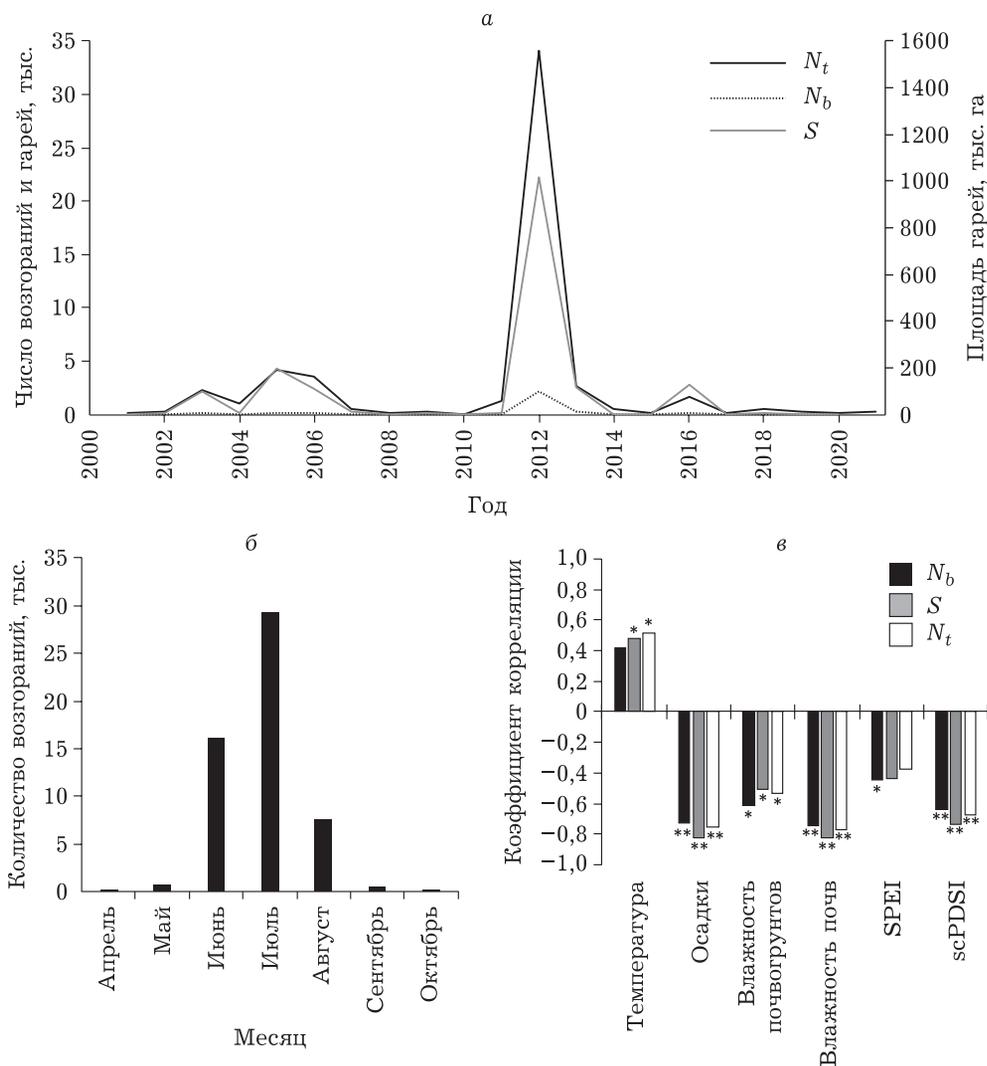


Рис. 3. Динамика числа возгораний (N_t) и гарей (N_b), площади (S) гарей (а); распределение числа возгораний в пожароопасный период (б); корреляции Спирмана между числом возгораний и гарей, площадью гарей и климатическими переменными (июнь – август) (в). Корреляции значимы: * – при $p < 0,05$, ** – при $p < 0,01$

ний и гарей коррелируются на высоком уровне значимости с параметрами увлажнения (сумма осадков, влажность почв и почвогрунтов, индекс scSPDI) (рис. 3, в). В то же время корреляции со среднелетней температурой ниже, а для количества гарей незначимы.

Возникновение лесных пожаров коррелируется с температурой воздуха, низкими величинами осадков, влажности почв и почвогрунтов, с индексами атмосферной засухи SPEI и scPDSI (рис. 3, в, 4). Аномально низкие значения индексов засухи наблюдаются в предшествующие возникновению пожаров годы (рис. 4, в–г).

Динамика межпожарных интервалов. Среднее медианное значение межпожарных

интервалов за период с XVIII по XXI в. составляет 23 ± 8 лет. Ретроспективные данные по величине МПИ указывают на постепенное сокращение МПИ, начиная с малого ледникового периода (1700-е) и до середины XX в. (рис. 5). МПИ, составлявшие в XVIII и XIX вв. 33 и 24 года соответственно, в середине XX в. снизились до 20 лет. В дальнейшем (1950–2006 гг.) величина МПИ возрастает до 27 лет, что, вероятно, обусловлено усилением мер по профилактике и борьбе с пожарами.

Воздействие пожаров на продуктивность растительного покрова. Пожар приводит к резкому снижению продуктивности растительного покрова – как в год его воз-

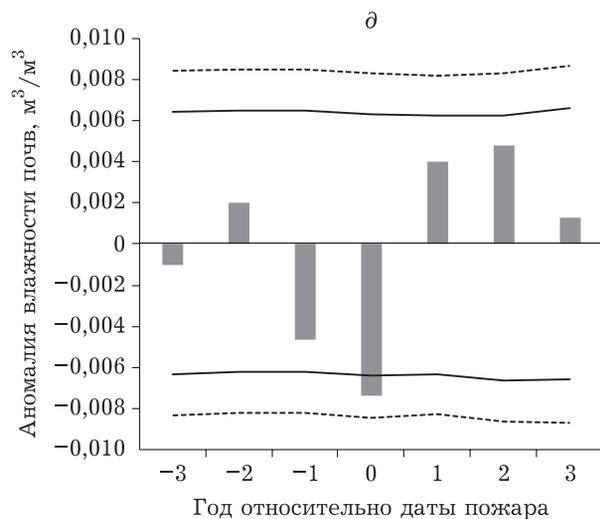
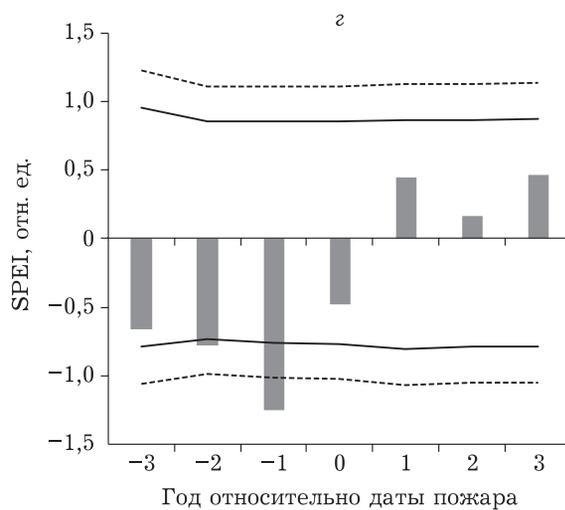
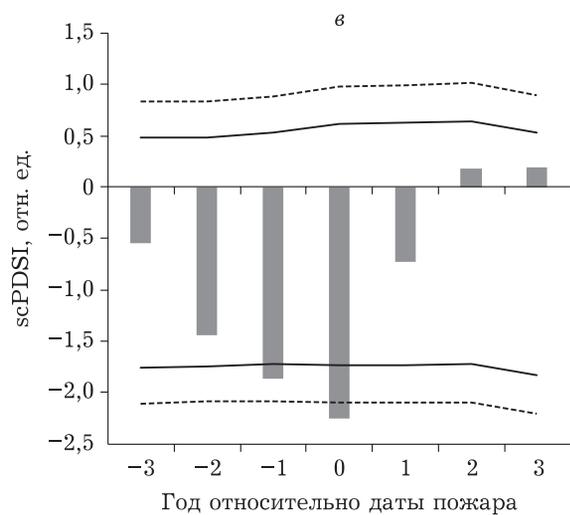
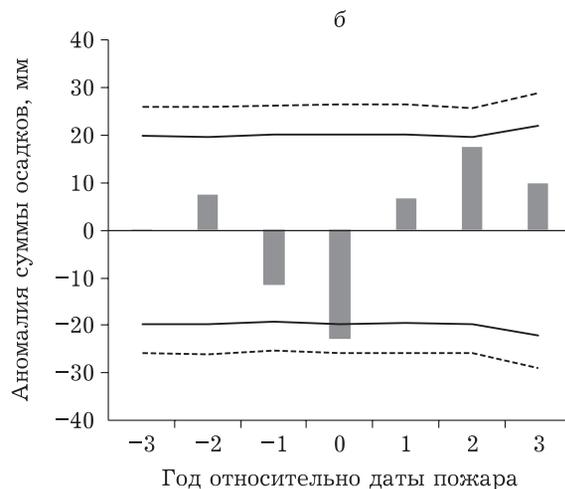
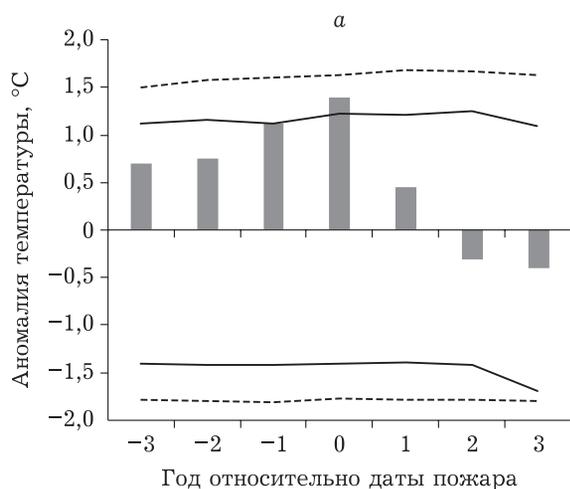


Рис. 4. Климатические аномалии, предшествующие датам возникновения пожаров: а – температура воздуха (июнь – июль), б – сумма осадков (июнь – июль), в – индекс scPDSI (июнь – август), г – индекс SPEI (июнь – август), д – влажность почв (июнь – июль). Нулевое значение по абсциссе соответствует дате возникновения пожара. Доверительные интервалы указаны сплошной ($p < 0,05$) и штриховой ($p < 0,01$) линиями

никновения, так и, особенно, в последующий год. Однако в дальнейшем продуктивность растительности быстро (в течение приблизительно декады) восстанавливается до предпо-

жарных величин с последующими возрастающими трендами (рис. 6, а, в).

По сравнению с растительным покровом, восстановление величины ИП деревьев сос-

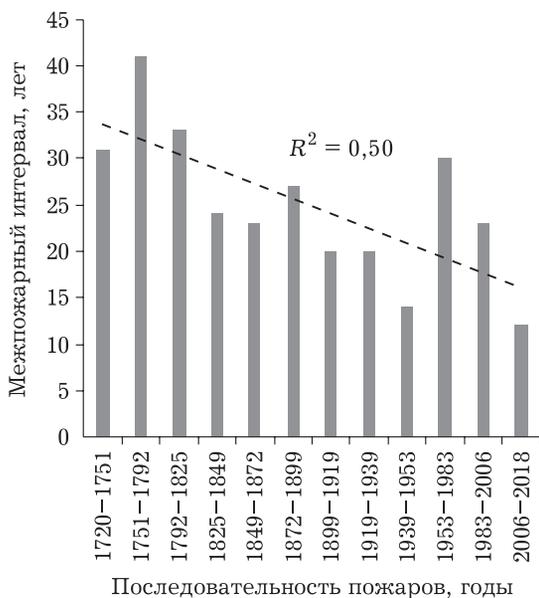


Рис. 5. Многолетняя динамика межпожарных интервалов в сосняках Средней Сибири

ны начинается с запозданием на 1–2 года (рис. 6, г) и продолжается в дальнейшем синхронно с восстановлением продуктивности растительного покрова (рис. 7). Наблюдаются высокие ($r^2 = 0,65 \dots 0,73$) корреляционные зависимости между ИП деревьев сосны и индексами продуктивности растительного покрова в период восстановления продуктивности растительного покрова, тогда как в предшествующий период корреляции были незначимы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Возникновение пожаров в сосновых лесах связано с аномалиями температуры и условий увлажнения, при этом последние оказывают преобладающее влияние на горимость. Возрастание засушливости также способствует увеличению площади и количества гарей (см. рис. 3, в). Наиболее сильные связи горимости (частоты возгораний и площади гарей) наблюдаются с суммой осадков, влажностью почв и индексами сухости, в то время как зависимости от температуры выражены слабее. Связь возникновения пожаров с аномалиями индекса сухости Палмера (scPDSI) зафиксирована также для территорий Западного Забайкалья [Wang et al., 2021] и Монгольского плато [Yao et al., 2022]. Необходимо отметить, что получен-

ные данные указывают на большую эффективность индекса scPDSI в сравнении с SPEI для целей оценки вероятности как возникновения пожара, так и площади гарей (см. рис. 3, в). Заслуживают внимания выявленные зависимости между параметрами горимости и влажностью почвогрунтов, оцениваемой на основе данных гравиметрической съемки (см. рис. 3, в). Наличие указанных связей открывает возможности использования гравиметрии в пирологических исследованиях. Отметим, что ранее данные гравиметрии были успешно применены в исследовании причин усыхания темнохвойных древостоев [Kharuk et al., 2017].

В целом в северных сосняках и лиственничниках преобладают малоинтенсивные (по сравнению с верховыми) низовые пожары. Распределение частоты возгораний в течение пожароопасного периода имеет одномодальную форму (см. рис. 3, б), что типично для северных широт [Kharuk et al., 2021]. В исследуемых сосновых лесах не выявлено значимых трендов возрастания горимости, характерных для Сибири в целом [Ponomarev et al., 2016; Kharuk et al., 2021]. Вместе с тем во второй декаде текущего столетия наблюдались как катастрофические (более 1 млн га) лесные пожары, так и значительное возрастание горимости: число возгораний и площадь гарей увеличились соответственно в 3,5 и 3,0 раза. Отметим, что в указанный период в аналогичной ситуации (возрастание горимости в 3,0 и 2,6 раза по числу возгораний и площади гарей) находилась Арктическая зона Сибири. Наряду с этим здесь происходило продвижение границы горимости в направлении Северного Ледовитого океана, где пожары были зафиксированы на его восточном побережье [Kharuk et al., 2021]. В другой части бореальной зоны – в лесах Канады и на Аляске – также наблюдается значительное возрастание площади больших пожаров [Calef et al., 2015; Hanes et al., 2019].

Результаты анализа долговременной динамики межпожарных интервалов указывают на снижение величины МПИ, наблюдающееся с конца Малого ледникового периода. Если в XVIII в. средняя величина МПИ составляла 33 года, то с началом потепления в XIX в. она сократилась до 24 лет с последующим снижением до 20 лет в первой

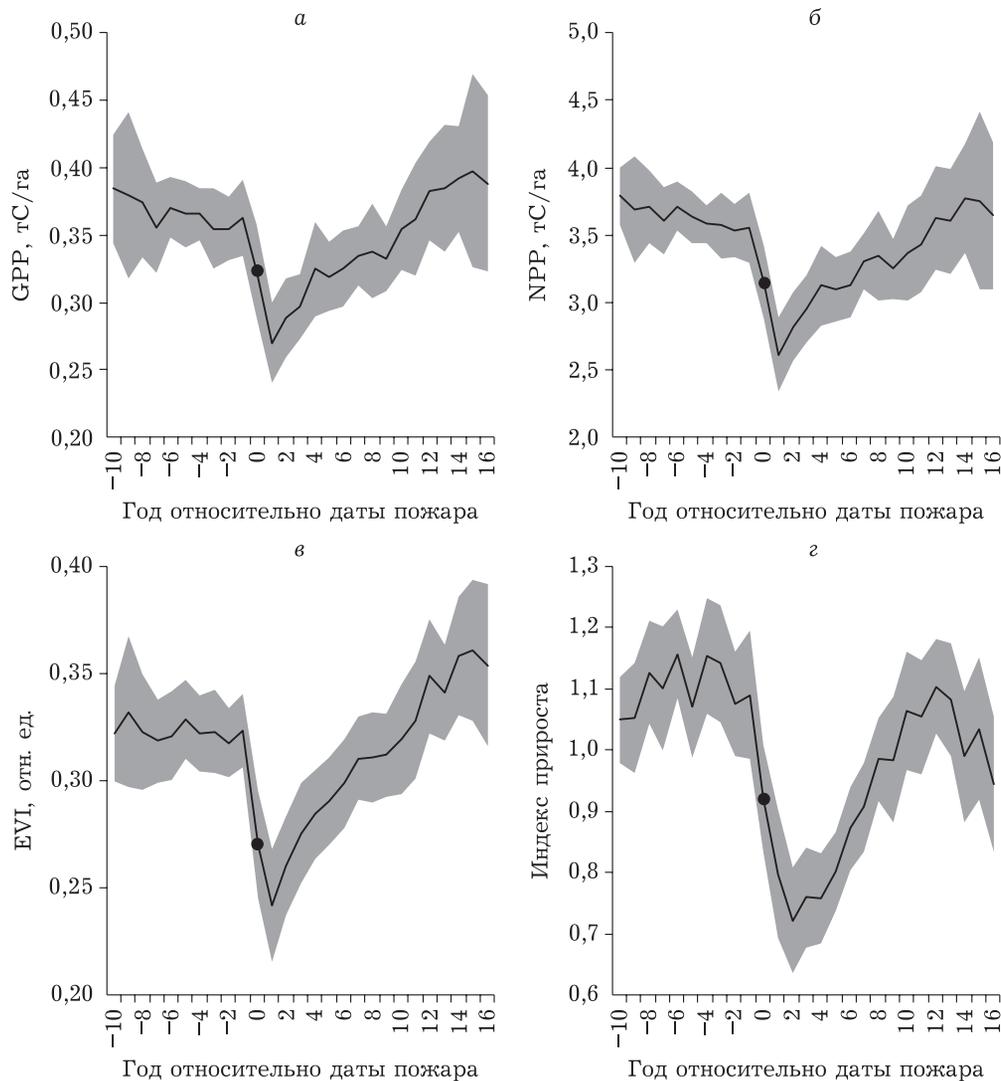


Рис. 6. Динамика пред- и послепожарной продуктивности растительного покрова, а также индекса радиального прироста сосны. а – GPP; б – NPP, в – EVI, г – индекс прироста. Нулевое значение по абсциссе соответствует дате пожара. Данные по индексам продуктивности рассчитаны на основе анализа пяти гарей; по ИП сосны – по 14 пожарным событиям. Доверительные интервалы ($p < 0,05$) выделены серым цветом

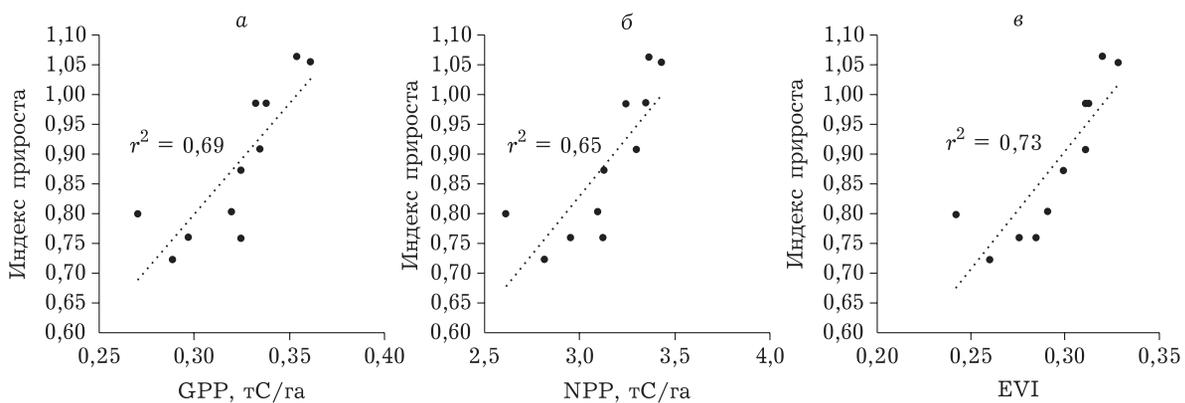


Рис. 7. Корреляционные зависимости между индексом радиального прироста сосны и индексами продуктивности растительного покрова (GPP, NPP и EVI) в первую декаду после пожара. Тренды значимы при $p < 0,01$

половине XX в. Вторая половина XX в. характеризуется усилением мер по предотвращению и борьбе с пожарами, что выразилось в возрастании МПИ до ~26 лет. Средняя величина МПИ за весь анализируемый период составила 23 ± 8 года. Согласно ранее проведенным оценкам, МПИ в сосняках исследуемого региона составляли в среднем 30 лет [Ваганов и др., 1996]. Согласно данным [Swetnam, Vaisan, 1996], межпожарный интервал в сосняках Средней Сибири составляет 20–40 лет, возрастающая в северном направлении. В южных сосняках (Балгазынский бор, Республика Тыва) величина МПИ оценивается ~23 годами [Иванова и др., 2015]. В сосняках Западного Забайкалья этот показатель колеблется в интервале от 4 до 45 лет [Wang et al., 2021].

Пожары в сосняках резко снижают продуктивность растительного покрова с минимальными значениями в следующем после пожара году. Однако в дальнейшем происходит быстрое возрастание продуктивности до предпожарного (и выше) уровня (см. рис. 6, а–в). В динамике ИП сосны минимум располагается на первом – третьем году после пожара с последующим восстановлением (см. рис. 6, г). Примечательна высокая корреляция, наблюдающаяся между ИП деревьев и оценками продуктивности растительного покрова, полученными на основе материалов дистанционного зондирования (индексами EVI, GPP и NPP; см. рис. 7). Аналогичная послепожарная динамика продуктивности зафиксирована на арктических территориях Сибири [Kharuk et al., 2022]

В целом низовые пожары в сосняках способствуют доминированию сосны на занимаемых этим видом площадях. Низовые пожары (а в отдельных случаях и верховые [Иванова и др., 2017]) стимулируют формирование возобновления за счет обогащения почв и уничтожения напочвенного покрова [Фуряев и др., 2017].

В заключение необходимо отметить, что сравнительно быстрое (в течение примерно десятилетия) восстановление продуктивности растительного покрова на горях указывает на сохранение углерод-депонирующей роли сосновых лесов в условиях меняющегося климата, возрастания частоты и площади пожаров. Аналогичные выводы содержатся в работах по динамике горимости и восстано-

вительной послепожарной динамике продуктивности растительного покрова в северных лиственничниках и в Арктической зоне Сибири [Kharuk et al., 2021, 2022].

ВЫВОДЫ

1. Возникновение пожаров в сосняках Сибири связано с аномально высокими значениями температуры воздуха и аномально низкими величинами увлажнения в период до возникновения пожара. Вместе с тем величины корреляции параметров горимости с температурой воздуха ниже, чем с условиями увлажнения. Величины осадков, влажность почв, индекс засушливости представляют основные факторы, обуславливающие как возникновение пожаров, так и площадь гарей.

2. Во втором десятилетии XXI в. наблюдались как катастрофические (более 1 млн га) лесные пожары, так и значительное возрастание горимости: число возгораний и площадь гарей увеличилось соответственно в 3,5 и 3,0 раза.

3. Выявлено снижение величины МПИ с 33 лет (конец Малого ледникового периода) до 20–25 лет в XX в.

4. Показано, что материалы спутниковой гравиметрической съемки применимы в оценке риска возникновения лесных пожаров.

5. Установлен высокий уровень корреляции между индексом прироста деревьев сосны и индексами продуктивности растительного покрова, генерируемыми по данным дистанционного зондирования. Полученный результат указывает на применимость индексов GPP, NPP, а также EVI в исследованиях продуктивности древостоев.

6. Продуктивность растительного покрова на горях, а также величина индекса радиального прироста деревьев сосны сравнительно быстро (в течение ~десятилетия) восстанавливаются до предпожарных величин, что указывает на сохранение северными сосняками углерод-депонирующей функции в условиях изменения климата и возрастания горимости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-44-240007 и Программы развития Томского государственного университета (“Приоритет 2030”).

ЛИТЕРАТУРА

- Барталев С. А., Стыщенко Ф. В. Спутниковая оценка гибели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденной огнем площади // Лесоведение. 2021. № 2. С. 115–122 [Bartalev S. A., Stytsenko F. V. Assessment of Forest-Stand Destruction by Fires Based on Remote-Sensing Data on the Seasonal Distribution of Burned Areas // Contemporary Problems of Ecology. 2021. Vol. 14, N 7. P. 711–716].
- Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- Барталев С. А., Стыщенко Ф. В., Егоров В. А., Лупян Е. А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
- Ваганов Е. А., Арбатская М. К., Шашкин А. В. История климата и частота пожаров в центральной части Красноярского края. 2. Дендрохронологический анализ связи изменчивости прироста деревьев, климата и частоты пожаров // Сиб. экол. журн. 1996. Т. 3, № 1. С. 19–28.
- Иванова Г. А., Иванов В. А., Ковалева Н. М., Конард С., Жила С. В., Тарасов П. А. Сукцессия растительности после высокоинтенсивного пожара в сосняке лишайниковом // Сиб. экол. журн. 2017. Т. 24, № 1. С. 61–71. [Ivanova G. A., Ivanov V. A., Kovaleva N. M., Conard C., Zhila S. V., Tarasov P. A. Succession of vegetation after a high-intensity fire in a pine forest with lichens // Contemporary Problems of Ecology. 2017. Vol. 10, N 1. P. 52–61].
- Иванова Г. А., Иванов В. А., Кукавская Е. А. Периодичность пожаров в лесах Республики Тыва // Хвойные бореальной зоны. 2015. Т. 33, № 5–6. С. 204–209.
- Фуряев В. В., Цветков П. А., Фуряев Е. В. Пожароустойчивость сосновых лесов Евразии в экстремальные пожароопасные сезоны // Хвойные бореальной зоны. 2017. Т. 35, № 3–4. С. 68–73.
- Харук В. И., Антамошкина О. А. Воздействие сибирского шелкопряда на горимость лесных территорий // Сиб. экол. журн. 2017. Т. 24, № 5. С. 647–654 [Kharuk V. I., Antamoshkina O. A. Impact of silkmouth outbreak on taiga wildfires // Contemporary Problems of Ecology. 2017. Vol. 10, N 5. P. 556–562].
- Цветков П. А. Пирофитность лиственницы Гмелина с позиций жизненных стратегий // Экология. 2004. № 4. С. 259–265 [Tsvetkov P. A. Pyrophytic properties of the larch *Larix gmelinii* in terms of life strategies // Rus. J. Ecol. 2004. Vol. 35, N 4. P. 224–229].
- Calef M. P., Varvak A., McGuire A. D., Chapin III F. S., Reinhold K. B. Recent changes in annual area burned in interior Alaska: The impact of fire management // Earth Interactions. 2015. N 19. P. 1–16.
- Coogan S. C. P., Robinne F.-N., Jain P., Flannigan M. D. Scientists' warning on wildfire – a Canadian perspective // Can. J. Forest Res. 2019. N 49. P. 1–9.
- Didan K., Munoz A. B. MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series). User's Guide. Version 3.10 For Collection 6. 2019.
- Dieterich J. A., Swetnam T. W. Dendrochronology of a Fire-Scarred Ponderosa Pine // Forest Sci. 1984. Vol. 30. P. 238–247.
- Flannigan M., Stocks B., Turetsky M., Wotton M. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest // Glob. Chang. Biol. 2009. N 15. P. 549–560.
- Fritts H. C. Tree-rings and climate. London; New York; San Francisco: Acad. Press, 1976. 576 p.
- Giglio L., Boschetti L., Roy D. P., Humber M. L., Justice C. O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // Remote Sens. Environ. 2018. N 217. P. 72–85.
- Giglio L., Desclotres J., Justice C. O., Kaufman Y. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. // Remote Sens. Environ. 2003. N 87. P. 273–282.
- Girardin M. P., Ali A. A., Carcaillet C., Mudelsee M., Drobyshev I., Hély C., Bergeron Y. Heterogeneous response of circumboreal wildfire risk to climate change since the early 1900s // Glob. Chang. Biol. 2009. N 15. P. 2751–2769.
- Hanes C. C., Wang X., Jain P., Parisien M.-A., Little J., Flannigan M. Fire regime changes in Canada over the last half century // Can. J. Forest Res. 2019. N 49. P. 256–269.
- Harvey B. J., Enright N. J. Climate change and altered fire regimes: impacts on plant populations, species, and ecosystems in both hemispheres // Plant Ecol. 2022. N 223. P. 699–709.
- Kharuk V. I., Dvinskaya M. L., Im S. T., Golyukov A. S., Smith K. T. Wildfires in the Siberian Arctic // Fire. 2022. Vol. 106, N 5. P. 1–16.
- 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. P. 2389–2397.
- 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 Ecol. and Management. 2017. Vol. 384. P. 191–199.
- 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. N 50. P. 1953–1974.
- Kitzberger T., Falk D. A., Westerling A. L., Swetnam T. W. Direct and indirect climate controls predict heterogeneous early-mid 21st century wildfire burned area across western and boreal North America // PLoS One. 2017. Vol. 12: e0188486.
- Madani N., Parazoo N. C., Kimball J. S., Reichle R. H., Chatterjee A., Watts J. D. et al. The impacts of climate and wildfire on ecosystem gross primary productivity in Alaska // J. Geophys. Res.: Biogeosciences. 2021. Vol. 126. e2020JG006078. <https://doi.org/10.1029/2020JG006078>
- Margolis E. Q., Guiterman C. H., Chavardes R. D. et al. The North American tree-ring fire-scar network // Eco-sphere. 2022. Vol. 13 (7). P. 1–36.
- Mekonnen Z. A., Riley W. J., Randerson J. T., Grant R. F., Rogers B. M. Expansion of high-latitude deciduous forests driven by interactions between climate warming and fire // Nat. Plants. 2019. N 5. P. 952–958.
- Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Ranson K. J. Wildfires Dynamics in Siberian Larch Forests // Forests. 2016. Vol. 125, N 7. P. 1–9.
- Rinn F. TSAP V 3.6 Reference manual: computer program for tree-ring analysis and presentation. Germany: Heidelberg, 1996. 263 p.
- Running S. W., Zhao M. Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2/A3) Products NASA Earth Observing System

- MODIS Land Algorithm. Users Guide. Version 3.0 For Collection 6. 2015.
- Speer J. H. Fundamentals of tree-ring research. University of Arizona Press, 2010. 509 p.
- Swetnam T., Baisan C. Historical fire regime patterns in the southwestern United States since AD 1700 // In Fire Effects in Southwestern Forest: Proceedings of the 2nd La Mesa Fire Symposium / Ed. C. D. Allen, 11-32. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RM-GTR-286. 1996.
- Todd S. K., Jewkes H. A. Wildland fire in Alaska: a history of organized fire suppression and management in the Last Frontier // University of Alaska Fairbanks, Agricultural and Forestry Experiment Station Bulletin. 2006. N 114. 64 p.
- Vasilakos C., Tsekouras G. E., Palaiologou P., Kalabokidis K. Neural-Network Time-Series Analysis of MODIS EVI for Post-Fire Vegetation Regrowth // ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2018. Vol. 7 (11). P. 420; doi:10.3390/ijgi7110420
- Vicente-Serrano S. M., Beguería S., López-Moreno J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming. The standardized precipitation evapotranspiration index // J. Climate. 2010. N 23. P. 1696–1718.
- Wang Z., Huang J. G., Ryzhkova N., Li J., Kryshen A., Voronin V., Li R., Bergeron Y., Drobyshch I. 352 years long fire history of a Siberian boreal forest and its primary driving factor // Glob. Planet. Change. 2021. Vol. 207. P. 103653.
- Wells N., Goddard S., Hayes M. J. A self-calibrating Palmer Drought Severity Index // J. Climate. 2004. N 17. P. 2335–2351.
- Yang Y., Long D., Guan H., Scanlon B. R., Simmons C. T., Jiang L., Xu X. GRACE satellite observed hydrological controls on interannual and seasonal variability in surface greenness over mainland Australia // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2014. N 119. P. 2245–2260.
- Yao Q., Fang K., Wang Z. Fire history and its forcing in Northeastern Asia boreal forests // Nat. Hazard Res. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2022.07.001>

Wildfire occurrence of pine forests in Central Siberia in a changing climate

I. A. PETROV^{1, 2, 4}, A. S. SHUSHPANOV^{1, 3, 4}, A. S. GOLYUKOV^{1, 2, 4}, M. L. DVINSKAYA^{1, 4}, V. I. KHARUK^{1, 2, 4}

¹*V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28
E-mail: petrovilsoran@gmail.com*

²*Siberian Federal University
660041, Krasnoyarsk, Svobodny pr., 79*

³*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
660037, Krasnoyarsk, Krasnoyarsky Rabochy av., 31*

⁴*Tomsk State University
634050, Tomsk, Lenin str., 36*

Climate changes entails an increase in the forests burning throughout the whole boreal zone. We have studied the long-term dynamics of fire rate and post-fire recovery of vegetation cover productivity in the pine forests of Central Siberia, and analyzed the dependences of the fire frequency and the burnt areas on climatic variables. Methodically, the work is based on a combined analysis of data from ground surveys, remote sensing (spectroradiometric and gravimetric surveys by Terra / MODIS and GRACE satellites), and coupled analysis of dendroecological data and environmental and climatic variables. The main impact on the fire frequency and burnt areas is due to the moistening conditions (total precipitation, soil moisture, aridity index scPDSI) in the period preceding the fire. The correlations of combustibility parameters with air temperature are lower than with humidification conditions. It is shown that soil moisture gravimetry data can be used in assessing the risk of forest fires. A decrease of Fire Return intervals from 33 years to 20–25 years in the period from the 18th to the 20th century was revealed. In the second decade of the 21st century, both catastrophic (more than 1 million ha) forest fires and a significant increase in flammability were observed: the number of fires and the area of burnt areas increased, respectively, by 3.5 and 3.0 times. A high level of correlation has been determined between the growth index of pine trees and the vegetation cover productivity indices (gross (GPP) and net (NPP) productivity) generated from remote sensing data. The result obtained indicates the applicability

of the indices in the studies of the forest stands productivity. Significant trends in flammability in the 21st century, both in terms of the frequency of fires and the areas covered by fire, have not been identified. The productivity of the vegetative cover on burnt areas, as well as the value of the index of radial increment of pine trees, quickly (within ~ a decade) recovers to pre-fire values, which indicates that northern pine forests retain their carbon-storing function under conditions of climate change and increased fire rate.

Key words: wildfires, burnt areas, wildfire occurrence in pine stands, productivity on burnt areas, GPP and NPP on burnt areas, climate and wildfires, remote sensing and wildfires.