

УДК 630*43:574.4:528.8 DOI 10.21685/2500-0578-2026-1-4

ТОПОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕРМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ В ГОРНЫХ ЛЕСАХ ЮЖНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ

С. М. Гусев¹, В. Т. Тишин²^{1, 2} Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия¹ SMGusev@kai.ru

Аннотация. На фоне глобальных климатических изменений проблема оценки пирогенной уязвимости особо охраняемых природных территорий горного обрамления озера Байкал приобретает критическое значение. Цель исследования – выявить пространственные и термодинамические закономерности локализации термических аномалий в зависимости от топографических характеристик рельефа горно-лесного пояса Южного Прибайкалья. Проанализирована непрерывная 25-летняя база данных (2001–2025) верифицированных активных термических аномалий системы FIRMS общим объемом 2485 очагов. Извлечение орографических характеристик проводилось на основе цифровой модели рельефа с разрешением 30 м. Пространственный анализ выполнен с использованием ГИС-алгоритмов в среде Python. Установлена выраженная нелинейная зависимость локализации термоточек от крутизны и экспозиции склонов. Выявлена бимодальная картина распределения: высокой пирогенной уязвимости подвержены как склоны южной экспозиции (за счет инсоляционного иссушения), так и северные макросклоны (вследствие привязки к антропогенной инфраструктуре побережья). Максимум термических аномалий приурочен к высотному поясу 1200–1500 м над уровнем моря и уклонам средней крутизны (5–20°). Крутизна склона напрямую влияет на мощность теплового излучения: экстремальные выбросы энергии фиксируются на уклонах вплоть до 30°, где сохраняется непрерывный лесной полог, и резко обрываются на экстремально крутых участках из-за фрагментации горючих материалов.

Ключевые слова: термические аномалии, термоточки, дистанционное зондирование Земли, рельеф, экспозиция, географическая информационная система, мощность теплового излучения, Байкальский заповедник

Финансирование: работа выполнена за счет субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету в рамках государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2024-0004.

Для цитирования: Гусев С. М., Тишин В. Т. Топографический контроль распределения и интенсивности термических аномалий в горных лесах Южного Прибайкалья // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2026. Vol. 11 (1). <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2026-1-4>

TOPOGRAPHIC CONTROL OF THE DISTRIBUTION AND INTENSITY OF THERMAL ANOMALIES IN THE MOUNTAIN FORESTS OF THE SOUTHERN BAIKAL REGION

S.M. Gusev¹, V.T. Tishin²^{1, 2} Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia¹ SMGusev@kai.ru

Abstract. Against the background of global climate change, the problem of assessing the pyrogenic vulnerability of specially protected natural areas in the mountainous framing of Lake Baikal is of critical importance. The purpose of the study is to reveal the spatial and thermodynamic patterns of thermal anomalies localization depending on the topographic characteristics of the relief of the mountain-forest belt of the Southern Baikal region. A continuous 25-year database (2001–2025) of verified active thermal anomalies of the FIRMS system with a total volume of 2,485 hotspots was analyzed. The extraction of orographic characteristics was carried out on the basis of a digital elevation model with a 30 m resolution. Spatial analysis was performed using GIS algorithms in the Python environment. A pronounced nonlinear dependence of the hotspots localization on the slope steepness and aspect was established. A bimodal distribution pattern was revealed: both southern slopes (due to insolation drying) and northern macroslopes (due to the proximity to the anthropogenic infrastructure of the coast) are highly vulnerable to pyrogenic impact. The maximum of thermal anomalies is confined to the altitudinal belt of 1200–1500 m above sea level and slopes of medium steepness (5–20°). Slope steepness directly affects the fire radiative power: extreme energy emissions are recorded on slopes up to 30°, where a continuous forest canopy remains, and abruptly end on extremely steep sections due to the fragmentation of combustible materials.

Keywords: thermal anomalies, hotspots, remote sensing, topography, aspect, geographic information system, fire radiative power, Baikal Nature Reserve

Financing: the work was carried out at the expense of a subsidy allocated to Kazan Federal University as part of the state assignment in the field of scientific activity, project no. FZSM-2024-0004.

For citation: Gusev S.M., Tishin V.T. Topographic control of the distribution and intensity of thermal anomalies in the mountain forests of the southern Baikal Region. Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2026;11(1). (In Russ.). Available from: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2026-1-4>

Введение

Лесные пожары являются одним из главных факторов, трансформирующих таежные экосистемы Сибири и Дальнего Востока [1–4]. На фоне наблюдаемых глобальных климатических изменений проблема оценки пирогенной уязвимости горных лесов приобретает критическое значение во всем мире [5–7]. В условиях горного рельефа Южного Прибайкалья пространственное распределение термоточек строго детерминировано орографией. Рельеф выступает мощным регулятором микроклимата, определяя режим солнечной инсоляции, скорость снеготаяния и ветровую нагрузку, что напрямую влияет на влажность лесных горючих материалов (ЛГМ) [8–10].

Развитие методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и спектрорадиометрии открыло новые возможности для оценки не только площади, но и термодинамической интенсивности пирогенных событий на основе регистрации активных термических аномалий (термоточек) и мощности их излучения (Fire Radiative Power, FRP) [2, 11, 12]. Однако детальные количественные оценки влияния топографии на параметры FRP в горных лесах бассейна озера Байкал остаются фрагментарными [10].

Физическая концепция мощности теплового излучения пожара базируется на законе Стеффана – Больцмана, описывающем интенсивность излучения абсолютно черного тела. Применительно к анализу термоточек, FRP (измеряемая в мегаваттах, МВт) представляет собой количественную меру скорости высвобождения лучистой энергии горящей биомассой в момент пролета спутника. Данный параметр имеет высокую корреляцию с объемами потребленного лесного горючего материала и интенсивностью эмиссии парниковых газов, что делает его ключевым индикатором термодинамической мощности пирогенного события. Согласно исследованиям глобального углеродного цикла, интеграл FRP по времени (Fire Radiative Energy, FRE) прямо пропорционален массе сгоревшей органики. В условиях горных лесов Южного Прибайкалья, где депонированы колоссальные запасы углерода в виде мощной лесной

подстилки и торфянистых горизонтов, точная оценка FRP приобретает стратегическое значение. Высвобождение диоксида углерода (CO_2), метана (CH_4) и мелкодисперсных аэрозолей ($\text{PM}_{2.5}$) при высокоинтенсивных пожарах не только ухудшает локальную экологическую обстановку, но и вносит существенный вклад в формирование положительной обратной связи глобального потепления: выбросы парниковых газов стимулируют дальнейший рост температур, что, в свою очередь, провоцирует рост дефицита давления водяного пара (VPD) и новые пожары [13]. Алгоритмы детектирования активного горения MOD14/MYD14 (для сенсора MODIS) и VNP14IMG (для VIIRS) используют спектральные каналы в среднем (около 4 мкм) и тепловом инфракрасном (около 11 мкм) диапазонах [11, 12]. Это дает возможность алгоритмам четко различать пиксели с высокотемпературными очагами и фоновое излучение окружающей поверхности и облаков.

Неравномерность термических аномалий в горных районах вызывает серьезный интерес у международного научного сообщества. Современные исследования, проводившиеся в разнообразных горных системах – от Североамериканских Кордильер до Тибетского плато – убедительно подтверждают, что орографическая структура является важным фактором пирогенного процесса. В частности, работы ученых из Канады и США показывают, что в условиях сложного рельефа скорость распространения границы пожара может нелинейно увеличиваться при движении вверх по склону из-за изменения угла взаимодействия пламени с горючими материалами и образования местных конвективных колонн [6]. Похожим образом, экспозиция склона влияет на радиационный баланс: южные и юго-западные макросклоны получают больше солнечного света, что ведет к формированию более ксерофитных растительных сообществ и хроническому дефициту влаги в почвах.

Цель исследования – установление пространственных и термодинамических принципов размещения тепловых аномалий в зависимости от особенностей рельефа в горно-лесной зоне Южного Прибайкалья.

Материалы и методы

Районом исследования выступает территория Южного Прибайкалья (Республика Бурятия), охватывающая горную систему хребта Хамар-Дабан, включая Байкальский государственный природный биосферный заповедник и его буферную зону (рис. 1). Хамар-Дабан функционирует как биогеографический барьер, создавая особую климатическую асимметрию, характерную для Восточной Сибири. Северный склон, направленный к озеру Байкал, переживает гумидный климат с годовыми осадками в пределах 1200–1400 мм. Такой уровень влаги способствует росту уникальных массивов темнохвойной тайги,

в которых основными видами являются пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.) и кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour). Напротив, южный макросклон находится в дождевой тени, характеризуется засушливым резко континентальным климатом (осадки составляют 400–500 мм в год) и доминированием светлохвойных сосново-лиственничных сообществ (*Pinus sylvestris* L., *Larix sibirica* Ledeb.), обладающих высокой природной пожарной опасностью. В верхнем лесном и подгольцовом поясах (свыше 1300–1500 м) на крутых каменистых склонах повсеместно распространены плотные заросли кедрового стланика (*Pinus pumila* (Pall.) Regel) [8].

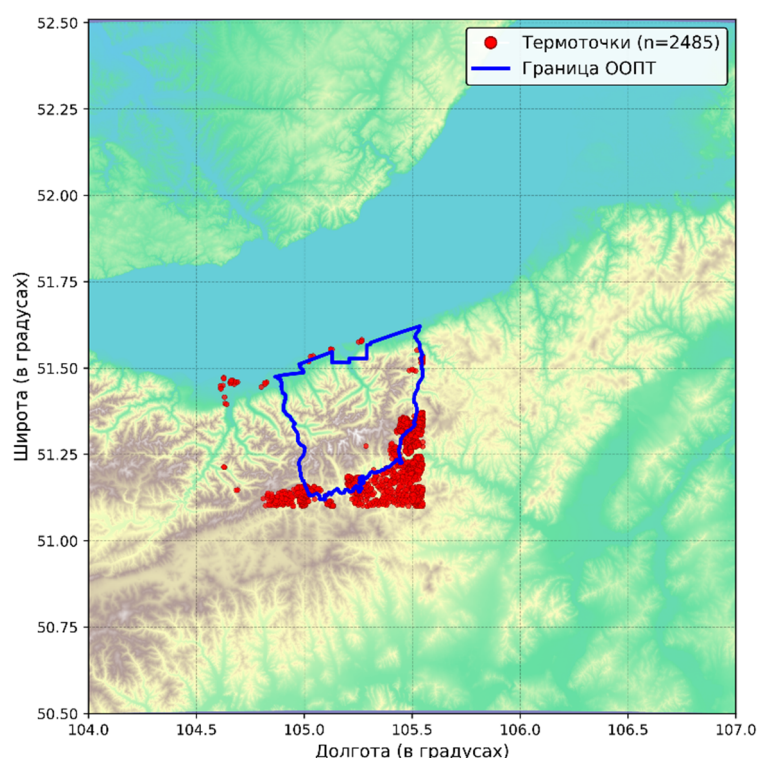


Рис. 1. Карта-схема пространственного распределения термических аномалий в Южном Прибайкалье (2001–2025)

Fig. 1. Schematic map of the spatial distribution of thermal anomalies in the Southern Baikal region (2001–2025)

Хамар-Дабан представляет собой сложную асимметричную горную систему. Эта асимметрия носит не только геоморфологический, но и ярко выраженный климатический характер. Огромная водная масса озера Байкал (объем около 23,6 тыс. км³) выполняет функцию гигантского терморегулятора, сглаживая температурные экстремумы на северном макросклоне. В летний период холодные воздушные массы над акваторией препятствуют развитию мощной конвекции в прибрежной зоне, однако при столкновении с орографическим барьером Хамар-Дабана происходит вынужденный подъем воздуха, сопровождающийся обильным выпадением осадков (орографические дожди) [14].

Подобный гидротермический режим формирует уникальные условия для развития влажной горной темнохвойной тайги, эдификаторами которой выступают пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.) и кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour). Лесная подстилка в этих формациях отличается высокой влагоемкостью и в годы с нормальным увлажнением выполняет функцию естественного противопожарного барьера. Однако на южном макросклоне, находящемся в аэродинамической «дождевой тени», формируется принципиально иная экосистема. Здесь, в условиях дефицита осадков и интенсивной инсоляции, доминируют светлохвойные леса из сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы

сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), в которых исторически сложился циклический пирогенный режим низовых пожаров [15]. Таким образом, Хамар-Дабан выступает модельным полигоном, где на относительно небольшой площади сконцентрированы кардинально различающиеся классы природной пожарной опасности. Объектом геоинформационного анализа послужила многолетняя база данных активных термических аномалий системы FIRMS (Fire Information for Resource Management System), зарегистрированных за непрерывный 25-летний период с 2001 по 2025 г. в течение пожароопасных сезонов (апрель–октябрь). Для обеспечения высокой надежности результатов и исключения техногенных источников тепла массив прошел строгую алгоритмическую фильтрацию: из анализа были исключены пиксели MODIS с доверительной вероятностью ниже 30 % [12], а также точки VIIRS со статусом достоверности «low» [11]. В контексте сложного горного рельефа критическое значение приобретает пространственное разрешение спутниковых сенсоров. Сенсор MODIS, обладая размером пикселя 1 км в надире, часто демонстрирует эффект «пропуска» (omission error) низкоинтенсивных пожаров на участках со сложной орографией из-за эффекта смешанного пикселя. В свою очередь, радиометр VIIRS (продукт VNP14IMG) с улучшенным пространственным разрешением 375 м обладаеткратно более высокой чувствительностью к термическим аномалиям малой площади. Использование комбинированного массива данных позволило нивелировать ограничения отдельных сенсоров: VIIRS обеспечил детальную детекцию очагов на начальных стадиях развития и на крутых уклонах, тогда как MODIS позволил верифицировать крупные пирогенные события.

Важно отметить орбитальную специфику применяемых космических аппаратов. Сенсоры MODIS установлены на солнечно-синхронных спутниках Terra и Aqua, пересекающих экватор в 10:30 и 13:30 по местному солнечному времени соответственно. Радиометр VIIRS на платформе Suomi-NPP также имеет дневное время пролета (около 13:30). Данный временной интервал (с 12:00 до 16:00) совпадает с суточным максимумом температур и минимумом относительной влажности воздуха, что соответствует пику суточной пирогенной активности. Тем не менее использование исключительно дискретных спутниковых снимков накладывает определенные ограничения на оценку непрерывной динамики пожара. В условиях сложной орографии Хамар-Дабана горно-долинные ветры могут резко менять направление и скорость распространения кромки огня в вечерние

и ночные часы, когда спутниковое покрытие минимально [16]. Этот фактор учитывался при интерпретации пиковых значений FRP.

После слияния баз данных была проведена строгая пространственно-временная дедупликация очагов, зафиксированных разными спутниками в одни сутки. Итоговая репрезентативная выборка составила 2485 верифицированных очагов. Экстракция орографических параметров проводилась на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) с пространственным разрешением 30 м с использованием языка программирования Python (библиотеки geopandas, rasterio) [17–19].

Пространственный анализ и интеграция разнородных данных выполнялись с использованием экосистемы библиотек языка программирования Python [17]. Векторная обработка координат термических аномалий реализовывалась средствами библиотеки GeoPandas [18]. Для обеспечения корректности метрических вычислений (расстояний и площадей) исходные координаты термоточек, изначально представленные в географической системе WGS 84 (EPSG:4326), перепроецировались в локальную прямоугольную систему координат (UTM). Извлечение топографических характеристик (высота, уклон, экспозиция) для каждой термоточки производилось путем оверлейного анализа векторного слоя очагов и растровой цифровой модели рельефа (ЦМР) с помощью модуля Rasterio [19]. Предварительно ЦМР прошла процедуру пространственной фильтрации для устранения локальных артефактов и заполнения пустот, что позволило избежать генерации аномальных значений уклона на пикселях с резкими перепадами высот. Подобная автоматизированная архитектура обработки данных исключила ошибки ручного геопозиционирования и обеспечила высокую точность извлечения морфометрических параметров для всей выборки из 2485 очагов.

Статистическая обработка массива данных проводилась с использованием модуля SciPy [20]. Предварительный разведочный анализ показал, что распределение значений мощности теплового излучения существенно отличается от нормального (гауссова) распределения из-за наличия «тяжелого» правого хвоста, образованного редкими, но экстремально интенсивными термоточками. В связи с невыполнением условия гомоскедастичности дисперсий применение классического однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) было признано некорректным. Для оценки статистической значимости различий между категориями уклонов применялся непараметрический Н-критерий Краскела–Уоллиса.

Результаты и их обсуждение

Анализ сезонной структуры пирогенных событий (рис. 2) выявил ярко выраженную сезонную динамику, детерминированную климатическим

режимом региона. Установлено, что пожароопасный сезон в горных лесах Южного Прибайкалья имеет ярко выраженный унимодальный характер с абсолютным доминированием ранне-летних детекций.

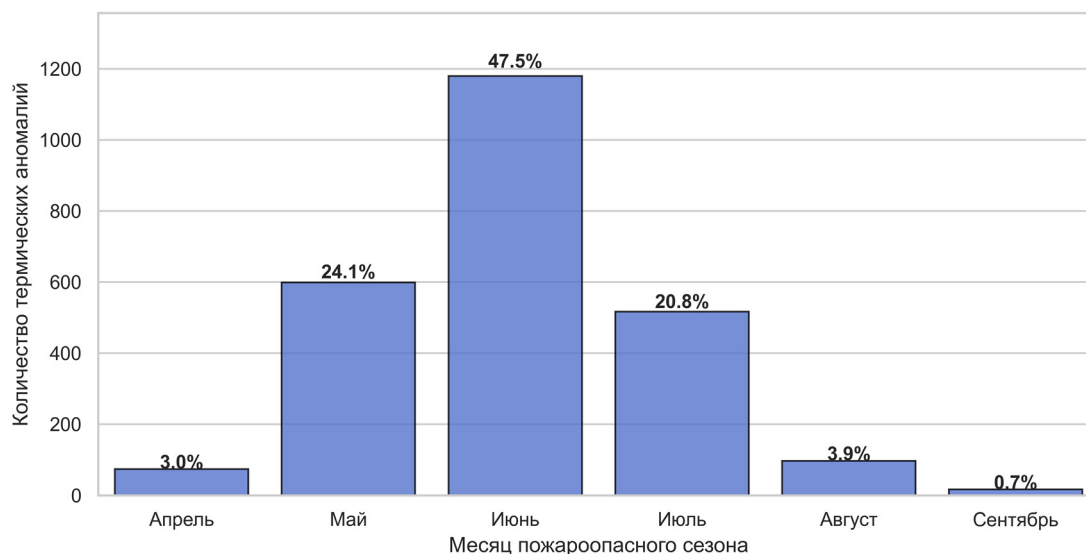


Рис. 2. Сезонная динамика распределения термических аномалий

Fig. 2. Seasonal dynamics of the thermal anomalies distribution

Анализ межсезонной динамики (рис. 2) демонстрирует, что пик пирогенной активности в Южном Прибайкалье приходится на июнь (47,5 % от общего числа термоточек) и май (24,1 %). Доля апреля при этом незначительна и составляет всего 3,0 %. Суммарно на весенне-раннелетний период (апрель-июнь) приходится 74,6 % всех зафиксированных термических аномалий. Мощная концентрация термоточек в мае и июне объясняется антропогенным фактором на фоне климатических особенностей: после схода снегового покрова в долинах и предгорьях, до активного развития зеленой растительности, прошлогодняя ветошь и опад молниеносно высыхают. Высокая пирогенная активность сохраняется и в июле (20,8 %), и лишь начиная с августа (3,9 %) и сентября (0,7 %), она резко идет на спад, что напрямую связано с сезоном обильных летних байкальских осадков.

Важным аспектом пространственно-временного анализа является межгодовая динамика распределения термических аномалий. Анализ 25-летнего временного ряда (2001–2025) позволил выявить выраженную цикличность пирогенной активности, тесно связанную с макроциркуляционными атмосферными процессами над территорией Сибири. За исследуемый период зарегистрировано несколько катастрофических пиков горимости, среди которых наиболее разрушительными стали сезоны 2003, 2015 и 2024 гг.

Формирование этих экстремальных пиков обусловлено установлением мощных блокирующих антициклонов, которые приводили к аномально длительным периодам без осадков на фоне экстремально высоких температур воздуха. В такие годы (особенно в 2015 г.) наблюдалось резкое возрастание дефицита давления водяного пара (Vapor Pressure Deficit, VPD), что провоцировало критическое иссушение лесных горючих материалов не только на предгорных равнинах, но и в горно-таежном поясе влажной темнохвойной тайги [21].

Показательно, что именно в годы климатических экстремумов фиксировалось максимальное количество термоточек с экстремальными значениями FRP (>1000 МВт). В периоды с нормальным гидротермическим режимом (например, 2005–2010 гг.) пирогенная активность находилась на фоновом уровне и была приурочена преимущественно к весенним антропогенным палам в буферной зоне заповедника, характеризующимся умеренной мощностью тепловыделения.

Вопреки ожиданиям о преимущественной горимости экстремально крутых горных склонов, абсолютный максимум термических аномалий концентрируется на покатых участках средней крутизны в диапазоне от 5 до 20° (с выраженным пиком на 10–12°). При этом на абсолютно пологих участках (0–5°) количество детекций относительно невелико. По мере роста угла

наклона свыше 20° наблюдается устойчивое уменьшение числа выявленных термоточек. Резкое уменьшение количества термоточек на крутых склонах (более 30°) объясняется тем, что такие участки труднодоступны для людей, а также геоморфологическими условиями – образованием курумника и выходом на поверхность скальных образований, что нарушает непрерывность слоя легковоспламеняющихся материалов леса и основных проводников пламени [22].

Особое внимание вызывает распределение термических аномалий в зависимости от склонов (рис. 4, 5). В отличие от традиционных представлений о преобладании южных экспозиций, полярная диаграмма и тепловая матрица показывают сложную бимодальную структуру. С одной стороны, наивысшая концентрация термоточек в одной топографической категории наблюдается на южных склонах с углом наклона $10\text{--}20^\circ$ (382 очага), что связано с «эффектом солнечного высушивания» ЛГМ.

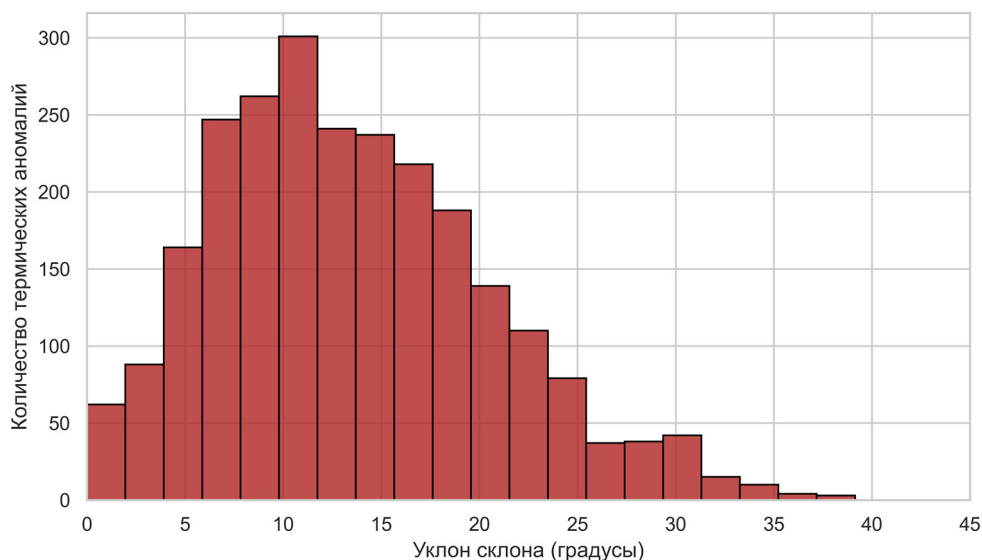


Рис. 3. Распределение термоточек по крутизне склонов

Fig. 3. Distribution of hotspots by slope steepness

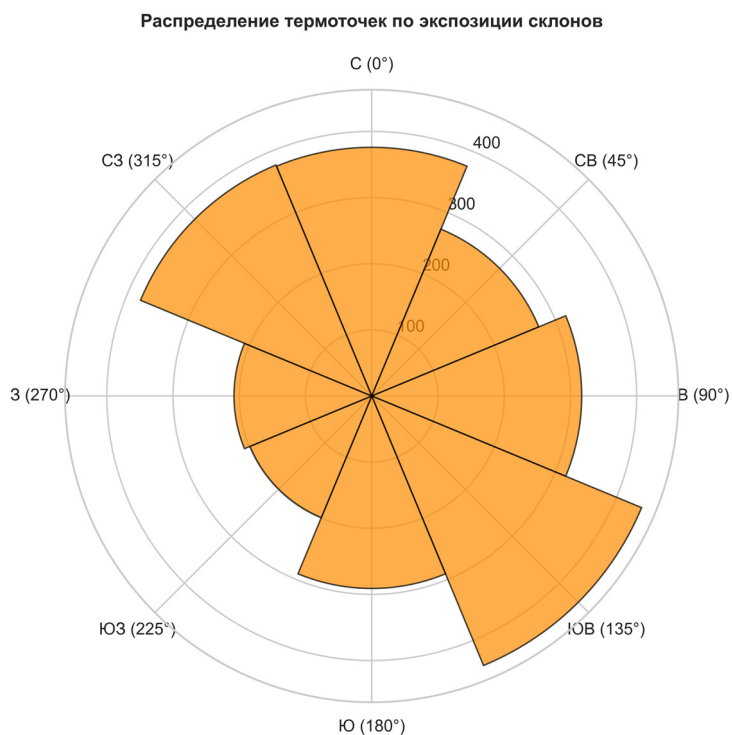


Рис. 4. Распределение термоточек по экспозиции склонов

Fig. 4. Distribution of hotspots by slope aspect

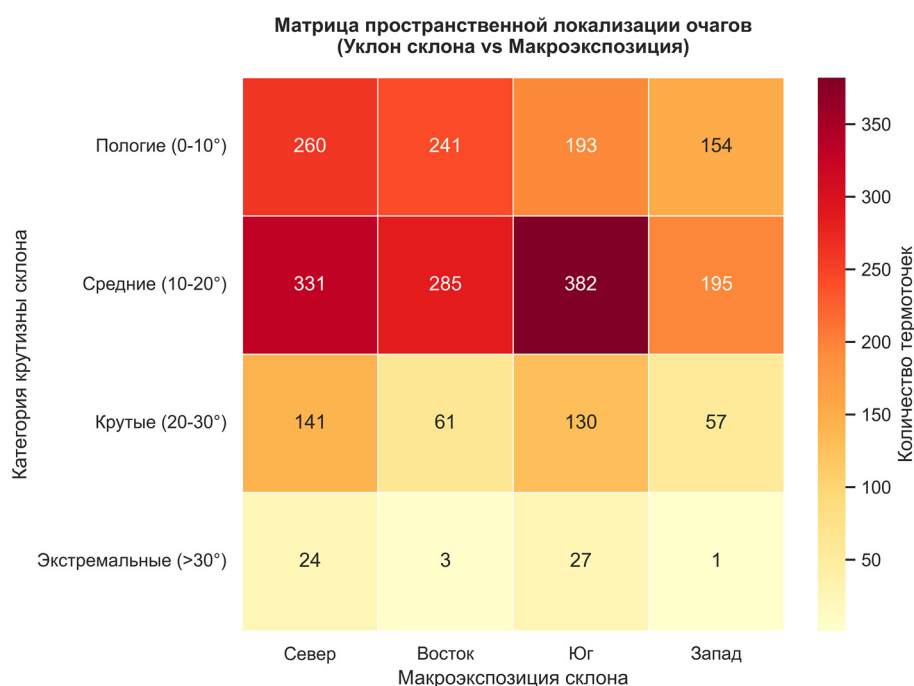


Рис. 5. Матрица пространственной локализации очагов (Уклон vs Макроэкспозиция)

Fig. 5. Heatmap of the spatial localization of hotspots (Slope steepness vs. Macro-aspect)

Топографическая детерминация термических аномалий неразрывно связана с фитоценотическим составом лесных насаждений. На южных и юго-западных склонах среднегорья Хамар-Дабана формируются ксерофитные насаждения из сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с развитым лишайниковым и мохово-кустарничковым покровом. Эта формация выступает идеальным проводником горения, обеспечивая быстрое распространение кромки пожара и генерацию стабильно высоких значений FRP.

Напротив, на северных и восточных макросклонах, куда перемещается активность на пологих участках (260 и 241 очаг соответственно), доминирует мезофитная темнохвойная тайга. Мощная органогенная подстилка в лесах из пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) и кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) в периоды экстремальных засух переходит в стадию длительного почвенного беспламенного тления. Несмотря на то, что спутниковые сенсоры могут фиксировать здесь более низкие медианные значения FRP из-за частичного экранирования пологом крон и задымления, экологический ущерб от термического повреждения поверхностных корневых систем оказывается фатальным. Тем не менее в сумме общее число термических аномалий на северном макросклоне (С, СЗ, СВ) не только не меньше, но и превышает таковое для южного (756 против 732 случаев). Значительная часть термоточек на северных и северо-западных склонах (включая 165 очагов на крутых и экстремальных участках с уклоном более 20°)

объясняется орографическими особенностями хребта Хамар-Дабан. Его северный макросклон обращен к берегу озера Байкал, где сосредоточены основные транспортные сети и высокая рекреационная нагрузка.

Вторым по значимости макрокластером выступают средние (10–20°) и пологие (0–10°) участки северной экспозиции (331 и 260 очагов соответственно), а также средние уклоны восточной экспозиции (285 очагов). Важно отметить, что экстремально крутые уклоны (>30°) характеризуются минимальным количеством очагов во всех румбовых группах, что подтверждает тезис о пространственной фрагментации фитомассы на крутых склонах. Высотно-поясное распределение термических аномалий (рис. 6) показывает, что абсолютный пик пирогенной активности приходится на среднегорный пояс (высоты от 1200 до 1500 м над уровнем моря).

В отличие от предгорных равнин (500–1000 м), где количество термоточек относительно невысоко, именно в среднегорье формируются оптимальные условия для накопления запасов лесных горючих материалов в формациях таежной зоны. Распространение огня в этот высотный пояс приводит к наиболее устойчивым и труднодоступным для ликвидации очагам теплового излучения. С переходом в высокогорный гольцовый пояс (>1800 м) количество детекций экспоненциально снижается из-за фрагментации растительного покрова и преобладания каменистых россыпей.

Высотно-поясное распределение термических аномалий

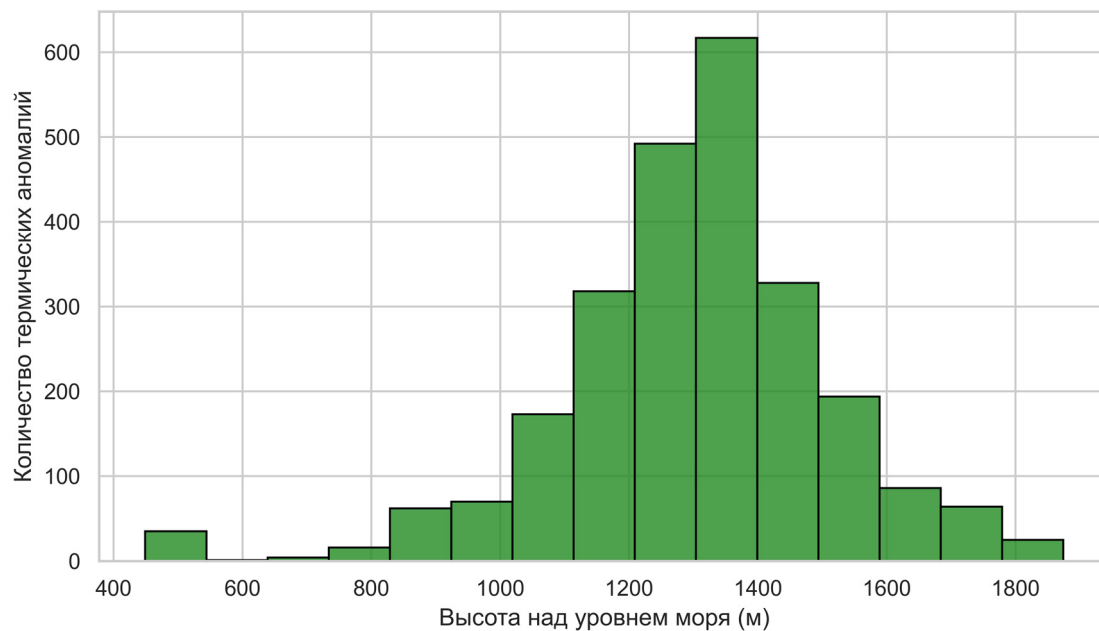


Рис. 6. Высотно-поясное распределение термических аномалий

Fig. 6. Altitudinal distribution of thermal anomalies

Интеграция сезонных данных позволила выявить выраженный высотно-временной сдвиг пирогенной активности в течение пожароопасного сезона. Анализ распределения термоточек показывает, что пространственная локализация очагов горения не является статичной, а закономерно мигрирует вверх по макросклону по мере развития вегетационного периода и изменения преобладающих источников возгорания.

В весенне-раннелетний период (май-июнь) абсолютное большинство термических аномалий сконцентрировано в предгорном и нижнем лесном поясах на высотах до 1000 м над уровнем моря. Сход снежного покрова на малых высотах происходит значительно раньше, обнажая прошлогоднюю травянистую растительность и лесной опад. Близость к населенным пунктам, транспортным магистралям и сельскохозяйственным угодьям побережья Байкала провоцирует массовые весенние неконтролируемые палы сухой травы, которые в условиях засушливой и ветреной погоды стремительно переходят на земли лесного фонда.

Кардинальная смена пространственной парадигмы происходит во второй половине лета (июль-август). В этот период пик термических аномалий смещается в труднодоступный среднегорный и верхний горно-таежный пояса на высоты 1200–1500 м и выше. К середине лета снежники в высокогорье полностью тают, а продолжительные блокирующие антициклоны приводят к критическому иссушению мощной органогенной подстилки. Главным триггером

пирогенных событий на данных высотах становятся природные факторы – массивированные удары сухих гроз, формирующихся на тепловых перифериях антициклонов. Возникающие в труднодоступных насаждениях пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) и кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) очаги характеризуются высокой устойчивостью к тушению и способны развиваться в крупные лесные пожары.

Выявленная высотная миграция пожаров (от весенних антропогенных в предгорьях к летним грозовым в высокогорье) имеет критическое значение для лесопожарного зонирования. Она доказывает необходимость динамического перераспределения сил и средств охраны лесов: от усиленного наземного патрулирования буферных зон побережья в мае к приоритетному авиационному мониторингу высокогорных лесов Хамар-Дабана в июле и августе.

Помимо пространственной локализации, в работе оценивалось влияние топографии на термодинамические характеристики тепловых аномалий, в частности на мощность теплового излучения. Однофакторный дисперсионный анализ по критерию Краскела – Уоллиса показал, что в масштабах всей 25-летней выборки различия медианных значений FRP по группам уклонов находятся на границе статистической значимости ($H = 6,62, p = 0,085$). Базовые (медианные) значения мощности сопоставимы и составляют 7,70–8,80 МВт на пологих, средних и крутых участках, возрастая до 13,30 МВт лишь на экстремально крутых склонах ($>30^\circ$). Анализ

распределения в логарифмическом масштабе (рис. 7) выявляет важнейшую закономерность: аномалии экстремальной интенсивности (выбросы мощности, превышающие сотни и тысячи мегаватт) фиксируются во всех категориях крутизны рельефа. Это свидетельствует о том, что при развитии высокоинтенсивного горения определяющую роль начинают играть

гидрометеорологические условия и запас лесных горючих материалов. В критических погодных условиях катастрофическое выделение энергии способно развиваться как на пологих предгорных террасах, так и на склонах значительной крутизны (вплоть до 30°), где еще сохраняется сплошной растительный покров и непрерывность горючих материалов.

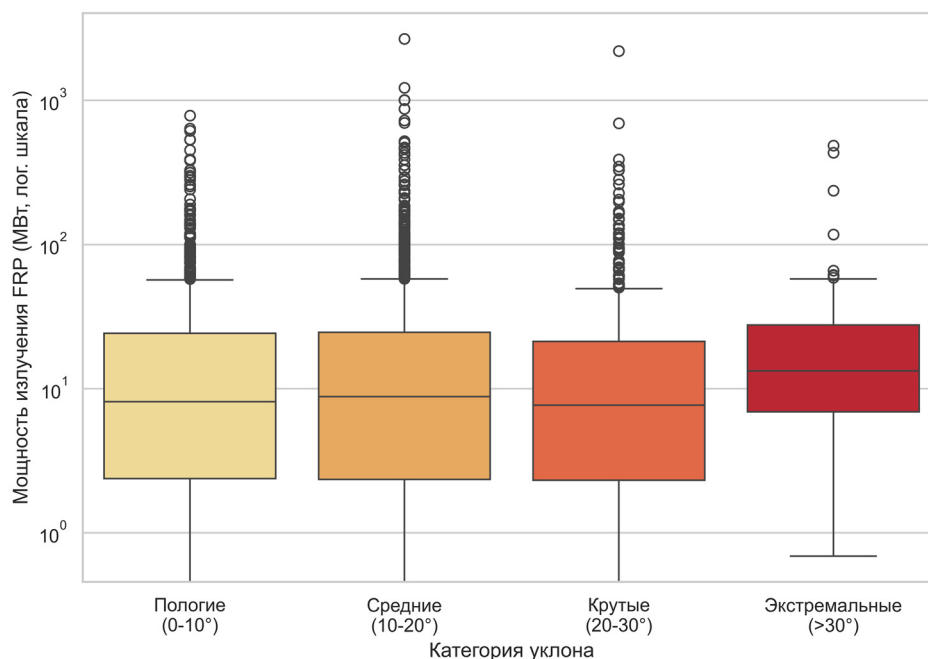


Рис. 7. Зависимость мощности излучения (FRP) от крутизны склона

Fig. 7. Dependence of Fire Radiative Power (FRP) on slope steepness

Полученные количественные данные о топографической детерминации термических аномалий в лесах Южного Прибайкалья согласуются с общемировыми трендами усиления пирогенной активности в горных регионах. Как отмечают зарубежные исследователи, глобальное потепление ведет к трансформации режима увлажнения именно в орографически сложных ландшафтах. Выявленная пространственная бимодальность (поражение северных и южных макросклонов) особенно ярко проявляется в пиковый пожароопасный период (июнь-июль), когда отсутствие осадков в начале лета усиливает влияние особенностей ландшафта южного макросклона Хамар-Дабана [5, 6].

Особого внимания заслуживает выявленный эффект «пирогенного ядра» на южных склонах (10–20°). Традиционно принято считать, что максимальной пожарной опасностью и скоростью распространения фронта пламени характеризуются склоны высокой крутизны. Тем не менее наше исследование, основанное на данных VIIRS и MODIS, указывает на то, что наибольшая частота термоточек наблюдается в среднегорье. Это может быть связано с тем, что на таких

склонах формируется густой и продуктивный лес из светлохвойных деревьев, что приводит к высокой концентрации горючих материалов. В то же время, на крутых склонах (более 30°) разрозненность почвенного покрова и сложные условия уменьшают накопление биомассы, создавая естественный барьер для распространения огня, несмотря на высокий потенциал конвекции.

Использование показателя FRP в методологии дало возможность выйти за рамки простого учета площадей сгоревших участков и оценить физическую интенсивность горения. Как было отмечено выше, небольшое увеличение медианных значений FRP на очень крутых склонах наблюдается на уровне статистической тенденции. Это свидетельствует о том, что рельеф не только служит «сценой» для термоточек, но также является фактором, влияющим на основную энергию теплового излучения. При этом отсутствие строгой статистической значимости ($p < 0,05$) подтверждает наш ключевой вывод: определяющую роль в генерации катастрофических выбросов играет не сама по себе крутизна склона, а наличие сплошного запаса лесных

горючих материалов, который на уклонах свыше 30° фрагментирован.

Перспективным направлением будущих исследований представляется совместный анализ данных FRP с продолжительными рядами радиального роста деревьев и изменениями в вегетационных индексах. Это даст возможность оценить не только текущую степень пирогенного стресса, но и долговременную способность горных лесов в Байкальском регионе противостоять растущей частоте экстремальных температурных аномалий.

Анализируя последствия термических аномалий высокой мощности на склонах от 10 до 30° , необходимо подчеркнуть их пролонгированное деструктивное воздействие на горно-таежные экосистемы. В отличие от пологих участков, где постпирогенное лесовосстановление может протекать по классическому сукцессионному сценарию, крутые макросклоны Южного Прибайкалья после высокоинтенсивных пожаров сталкиваются с необратимой трансформацией ландшафта. Полное выгорание органогенного горизонта и лесной подстилки при экстремальных значениях лучистой энергии приводит к критическому снижению противозерозной устойчивости горных почв.

В условиях характерных для региона интенсивных летних осадков, обнаженные минеральные горизонты на склонах свыше 15° подвергаются катастрофическому плоскостному смыву и линейной эрозии. Происходит вынос зольных элементов и биогенных веществ непосредственно в гидрологическую сеть, питающую акваторию озера Байкал. Более того, уничтожение затеняющего лесного полога на южных экспозициях запускает механизм положительной обратной связи: инсоляционная нагрузка на открытые участки многократно возрастает, поверхность почвы перегревается, что блокирует возобновление темнохвойных пород (*Abies sibirica* Ledeb., *Pinus sibirica* Du Tour) и способствует экспансии ксерофитной растительности. Таким образом, однократное пирогенное событие высокой интенсивности в среднегорном поясе способно полностью изменить вектор развития экосистемы, формируя длительно производные и пирогенно-активные пустоши.

Дискутируя о пространственно-временном распределении термических аномалий, необходимо критически оценивать объективные ограничения методов дистанционного зондирования в условиях Байкальской природной территории. Первым и наиболее значимым лимитирующим фактором выступает высокая циклоническая активность и специфический режим облачности над акваторией озера Байкал и северными макросклонами Хамар-Дабана. Оптически плотная

облачность способна полностью экранировать тепловое излучение от очагов горения в спектральных каналах 4 мкм, что приводит к недоучету термических аномалий в периоды прохождения атмосферных фронтов [23].

Вторым ограничением является аэрозольная оптическая толщина, которая появляется при массовых лесных пожарах в периоды блокирующих антициклонов. Высокая концентрация мелкодисперсных частиц и водяного пара в конвективной колонне пожара способна поглощать и рассеивать инфракрасное излучение, занижая реальные значения регистрируемой мощности (FRP) на 20 – 40 % [24].

Третий фактор специфичен именно для горного рельефа – это эффект геометрического искажения пикселя на краях полосы обзора и топографическое затенение. В глубоких ущельях с крутизной свыше 40° очаги горения могут физически скрываться от сенсора за элементами рельефа, если угол визирования спутника не совпадает с экспозицией склона. Совокупность этих факторов позволяет утверждать, что полученная нами 25-летняя база данных (2485 очагов), несмотря на ее репрезентативность, отражает консервативную (нижнюю) границу реального масштаба пирогенного воздействия на экосистемы Южного Прибайкалья.

Применение показателя FRP позволило установить, что уклон склона нелинейно влияет на количество энергии, выделяемой во время горения: медианные значения немного увеличиваются на крутых участках, но производство экстремальных тепловых выбросов прекращается на склонах более 30° из-за отсутствия сплошности горючих материалов. Это крайне важно учитывать при разработке мер по противопожарной безопасности в горно-лесных ландшафтах Байкальского региона, а также при обновлении региональных шкал пожарной опасности [25].

Заключение

1. На основе 25-летней базы данных установлено, что локализация термических аномалий строго детерминирована горным рельефом, однако демонстрирует бимодальную картину распределения. Высокой пирогенной нагрузке подвержены как южные макросклоны, так и северные макросклоны хребта Хамар-Дабан.

2. Абсолютный пространственный максимум термоточек приурочен к высотному поясу 1200 – 1500 м над уровнем моря и покатым склонам (5 – 20°).

3. Выявлена мощная сезонная динамика с абсолютным максимумом в конце весны и первой половине лета. На май, июнь и июль приходится

подавляющее большинство (92,4 %) всех зафиксированных термических аномалий, что обусловлено критической сухостью горючих материалов до начала сезона обильных байкальских осадков в августе.

4. Установлено, что условия для развития катастрофических пожаров с экстремальным тепловыделением ($FRP > 1000$ МВт) сохраняются на склонах крутизной вплоть до 30° , где присутствует сомкнутый лесной полог. На экстремальных же уклонах (более 30°) генерация сверхмощных тепловых выбросов блокируется

естественной пространственной фрагментацией фитомассы и разрывом горючих материалов.

5. Полученные количественные закономерности имеют прикладное значение. Интеграция выявленной матрицы пространственно-временной уязвимости может служить фундаментальной базой для совершенствования региональных шкал пожарной опасности, а также для риск-ориентированной оптимизации маршрутов наземного патрулирования и полетов БПЛА на особо охраняемых природных территориях Байкальского региона.

Список литературы

1. Пономарев Е. И., Харук В. И., Якимов Н. Д. Текущие результаты и перспективы спутникового мониторинга лесных пожаров в Сибири // Сибирский лесной журнал. 2017. № 5. С. 25–36.
2. Ponomarev E. I., Zabrodin A. N., Shvetsov E. G., Ponomareva T. V. Wildfire intensity and fire emissions in Siberia // Fire. 2023. Vol. 6 (7). P. 246.
3. Краснощекоев Ю. Н. Влияние пирогенного фактора на серогумусовые почвы сосновых лесов в центральной экологической зоне Байкальской природной территории // Сибирский лесной журнал. 2014. № 2. С. 43–52.
4. Григорьев Е. А., Капралова Д. О., Пермитина Л. И. Использование данных отечественных КА ДЗЗ для изучения динамики восстановления эколого-ресурсного потенциала лесных территорий после воздействия лесных пожаров // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26 (1). С. 52–62.
5. Andela N., Morton D. C., Giglio L. [et al.]. A human-driven decline in global burned area // Science. 2017. Vol. 356 (6345). P. 1356–1362.
6. Prichard S. J., Hessburg P. F., Hagemann R. K. [et al.]. Adapting western North American forests to climate change and wildfires: 10 common questions // Ecological Applications. 2021. Vol. 31 (8). e02433.
7. Nurrohman R. K., Kato T., Ninomiya H. [et al.]. Future projections of Siberian wildfire and aerosol emissions // Biogeosciences. 2024. Vol. 21. P. 4195–4220.
8. Белов А. В., Соколова Л. П. Геоботаническое прогнозирование в системе экологической оптимизации // География и природные ресурсы. 2017. № 1. С. 35–47.
9. Евдокименко М. Д. Пирогенная опасность в лесах Байкальской природной территории // География и природные ресурсы. 2015. № 4. С. 55–62.
10. Пономарев Е. И., Харук В. И., Иванов В. В. Пожары в лесах Сибири в начале XXI века // Сибирский лесной журнал. 2016. № 4. С. 44–55.
11. Schroeder W., Oliva P., Giglio L., Csiszar I. The new VIIRS 375 m active fire detection data product: algorithm description and initial assessment // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 143. P. 85–96.
12. Giglio L., Schroeder W., Justice C. O. The Collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // Remote Sensing of Environment. 2016. Vol. 178. P. 31–41.
13. Bowman D. M. Fire in the Earth system // Science. 2009. Vol. 324. P. 481–484.
14. Галазий Г. И. Байкал в вопросах и ответах. Иркутск : Восточно-Сибирское книжное издательство, 1984. 368 с.
15. Фурьев В. В. Роль пожаров в процессе лесообразования. Новосибирск : Наука, 1996. 253 с.
16. Freeborn P. H. Relationships between energy release, fuel mass loss, and trace gas and aerosol emissions during laboratory biomass fires // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2008. Vol. 113. D1.
17. Python Language Reference / Python Software Foundation. URL: <https://www.python.org> (дата обращения: 05.03.2026).
18. Jordahl K. GeoPandas: Python tools for geographic data. URL: <https://geopandas.org> (дата обращения: 05.03.2026).
19. Gillies S. Rasterio: geospatial raster I/O for Python programmers. URL: <https://rasterio.readthedocs.io> (дата обращения: 05.03.2026).
20. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T. E. [et al.]. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python // Nature Methods. 2020. Vol. 17. P. 261–272.
21. Евдокименко М. Д. Пирогенные трансформации байкальских лесов: ретроспектива и современность // Сибирский лесной журнал. 2014. № 3. С. 64–75.
22. Волокитина А. В. Разработка определителя основных проводников горения (на примере Красноярского Приангарья) // Сибирский лесной журнал. 2023. № 6. С. 50–62.
23. Kaufman Y. J. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS // Journal of Geophysical Research. 1998. Vol. 103. P. 32215–32238.

24. Lentile L. B. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects // *International Journal of Wildland Fire*. 2006. Vol. 15 (3). P. 319–345.
25. Иванов В. А., Иванова Г. А., Бакшеева Е. О. Актуализация региональных шкал пожарной опасности по лесным районам Красноярского края // *Сибирский лесной журнал*. 2023. № 6. С. 39–49.

References

1. Ponomarev E.I., Kharuk V.I., Yakimov N.D. Current results and prospects of satellite monitoring of forest fires in Siberia. *Sibirskiy lesnoy zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*. 2017;(5):25–36. (In Russ.)
2. Ponomarev E.I., Zabrodin A.N., Shvetsov E.G., Ponomareva T.V. Wildfire intensity and fire emissions in Siberia. *Fire*. 2023;6(7):246.
3. Krasnoshchekov Yu.N. The influence of the pyrogenic factor on gray-humus soils of pine forests in the central ecological zone of the Baikal natural territory. *Sibirskiy lesnoy zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*. 2014;(2):43–52. (In Russ.)
4. Grigor'yets E.A., Kapralova D.O., Permitina L.I. Using data from domestic satellite remote sensing systems to study the dynamics of restoration of the ecological and resource potential of forest areas after the impact of forest fires. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2018;26 (1):52–62. (In Russ.)
5. Andela N., Morton D. C., Giglio L. et al. A human-driven decline in global burned area. *Science*. 2017;356(6345):1356–1362.
6. Prichard S.J., Hessburg P.F., Haggmann R.K. et al. Adapting western North American forests to climate change and wildfires: 10 common questions. *Ecological Applications*. 2021;31(8):e02433.
7. Nurrohman R.K., Kato T., Ninomiya H. et al. Future projections of Siberian wildfire and aerosol emissions. *Biogeosciences*. 2024;21:4195–4220.
8. Belov A.V., Sokolova L.P. Geobotanical forecasting in the system of environmental optimization. *Geografiya i prirodnyye resursy = Geography and Natural Resources*. 2017;(1):35–47. (In Russ.)
9. Yevdokimenko M.D. Pyrogenic hazard in the forests of the Baikal natural territory. *Geografiya i prirodnyye resursy = Geography and Natural Resources*. 2015;(4):55–62. (In Russ.)
10. Ponomarev E.I., Kharuk V.I., Ivanov V.V. Forest fires in Siberia at the beginning of the 19th century. *Sibirskiy lesnoy zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*. 2016;(4):44–55. (In Russ.)
11. Schroeder W., Oliva P., Giglio L., Csiszar I. The new VIIRS 375 m active fire detection data product: algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment*. 2014;143:85–96.
12. Giglio L., Schroeder W., Justice C.O. The Collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment*. 2016;178:31–41.
13. Bowman D.M. Fire in the Earth system. *Science*. 2009;324:481–484.
14. Galaziy G.I. *Baykal v voprosakh i otvetakh = Baikal in questions and answers*. Irkutsk: Vostochno-Sibirskoye knizhnoye izdatel'stvo, 1984:368. (In Russ.)
15. Furyayev V.V. *Rol' pozharov v protsesse lesoobrazovaniya = The role of fires in the process of forest formation*. Novosibirsk: Nauka, 1996:253. (In Russ.)
16. Freeborn P.H. Relationships between energy release, fuel mass loss, and trace gas and aerosol emissions during laboratory biomass fires. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2008;113:D1.
17. *Python Language Reference*. Python Software Foundation. Available at: <https://www.python.org> (accessed 05.03.2026).
18. Jordahl K. *GeoPandas: Python tools for geographic data*. Available at: <https://geopandas.org> (accessed 05.03.2026).
19. Gillies S. *Rasterio: geospatial raster I/O for Python programmers*. Available at: <https://rasterio.readthedocs.io> (accessed 05.03.2026).
20. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*. 2020;17:261–272.
21. Yevdokimenko M.D. Pyrogenic transformations of Baikal forests: retrospective and modernity. *Sibirskiy lesnoy zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*. 2014;(3):64–75. (In Russ.)
22. Volokitina A.V. Development of an identifier for the main combustion conductors (using the Krasnoyarsk Angara region as an example). *Sibirskiy lesnoy zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*. 2023;(6):50–62. (In Russ.)
23. Kaufman Y.J. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. *Journal of Geophysical Research*. 1998;103:32215–32238.
24. Lentile L.B. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*. 2006;15(3):319–345.
25. Ivanov V.A., Ivanova G.A., Baksheyeva E.O. Updating regional fire hazard scales for forested areas of Krasnoyarsk Krai. *Sibirskiy lesnoy zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*. 2023;(6):39–49. (In Russ.)