

Мощность теплоизлучения от пожаров арктической зоны Сибири в зависимости от метеоусловий

А. В. Мальканова, П. Д. Третьяков, Е. И. Пономарёв

Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, 660036, Россия
E-mails: malkanova@ksc.krasn.ru, ptretyakov99@mail.ru, evg@ksc.krasn.ru
Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия

Исследована вариативность мощности теплоизлучения, определяемой по технологии FRP (*англ.* Fire Radiative Power), для пожаров арктической зоны Сибири (64–74° с.ш., 60–150° в.д.). Работа выполнялась на основе стандартного продукта MOD14 спутниковых систем Terra и Aqua за период 2001–2023 гг. Максимальная радиационная мощность теплоизлучения от пожаров FRP зафиксирована в восточной части арктической зоны Сибири в условиях преобладания лиственничных древостоев, где FRP в два раза выше, чем в субрегионах западной арктической зоны Сибири. Установлено, что в пожароопасные сезоны с экстремальными метеоусловиями средние значения FRP в большинстве исследуемых субрегионов на 11,7–13,0 % выше, чем в сезоны с низким режимом пожарной опасности по условиям погоды. Определён уровень корреляционной связи между FRP, уровнем пожарной опасности по условиям погоды (показатель влажности ПВ-1), а также межсезонной динамикой гидротермического коэффициента (ГТК). Параметр ПВ-1 имеет более тесную связь ($r = 0,7$ при $p < 0,05$) с вариацией FRP в сравнении со связью между FRP и ГТК ($r = -0,5$ при $p < 0,05$). Пространственная экстраполяция средствами ГИС констатирует, что в течение рассмотренного периода положительная динамика мощности теплоизлучения от пожаров была характерна для 21–56 % площади арктической зоны Сибири, при этом восточная часть региона характеризуется наибольшим распространением области роста значений FRP пожаров — до 42–56 % рассматриваемой территории.

Ключевые слова: арктическая зона Сибири, мощность теплоизлучения от пожаров, FRP, гидротермический коэффициент, ГТК, ПВ-1, горимость

Одобрена к печати: 19.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-202-213

Введение

Актуальность исследования горимости лесов и послепожарных эффектов в арктической зоне Сибири возрастает на фоне регистрируемых изменений климата. Изменения климата в Арктике привлекают особое внимание в связи с вероятными значительными экологическими последствиями ближайшей перспективы. Потепление здесь происходит вдвое быстрее, чем в других регионах планеты. Результаты многих оценок показывают, что такая тенденция сохранится в долгосрочной перспективе (Алексеев и др., 2014). По данным Всемирной метеорологической организации (*англ.* World Meteorological Organization) (The Global..., 2023) самые крупные положительные аномалии температуры воздуха за десятилетие 2011–2020 гг., местами более чем на 2 °С превышающие средние значения за 1981–2010 гг., были зафиксированы в арктической части Сибири.

Вместе с тем в Сибири, и в арктической части в частности, отмечается тенденция к увеличению повторяемости экстремальных пожарных сезонов, вызванных аномалиями погодных условий летнего периода. Особенно заметно смещение пожаров в северные широты, что показательно проявилось в 2020–2023 гг. (Conard, Ponomarev, 2020; Descals et al., 2022; Khaik et al., 2022). Повторяемость экстремальных пожарных событий в арктической зоне Сибири позволяет прогнозировать качественно новый уровень горимости региона в ближайшей перспективе, а также подчёркивает актуальность изучения динамики горимости и характеристик пожаров при современных климатических трендах (Мальканова, Пономарев, 2025; Третьяков, Пономарёв, 2023). Пожары арктической зоны Сибири сопровождаются серьёзными

экологические последствия, в том числе значительные выбросы парниковых газов, усугубляющих изменения климата, и деградация существующих экосистем криолитозоны, что требует всестороннего изучения.

Дистанционные данные стали важным инструментом для контроля пожаров и масштабов послепожарных процессов (Лупян и др., 2021; Пономарев и др., 2018). Одной из актуальных методик регистрации параметров горения дистанционными средствами является FRP (*англ.* Fire Radiative Power), позволяющая оценивать интенсивность активных очагов горения и послепожарные эффекты, основываясь на прямых измерениях радиационной мощности от зон активного горения (Wooster, Zhang, 2004). С помощью данной методики можно определять степень повреждения лесных массивов и особенности динамики пожаров в различных внешних условиях (Лупян и др., 2021; Швецов, Пономарев, 2015; Wooster, Zhang, 2004; Zabrodin, Ponomarev, 2024). Учитывая широкий спектр лесорастительных условий в арктической зоне Сибири, важно понимать характерные особенности природных пожаров в масштабе субрегионов, что обеспечивается использованием этой методики.

Важнейшим фактором, определяющим вероятность возникновения пожаров, представляется длительность бездождных периодов и температурный режим. Засухи в условиях антициклонов характеризуются устойчивой погодой с высокой для данной местности температурой воздуха (Hayasaka, 2021). При этом повышенная испаряемость вследствие интенсивной инсоляции, понижение влажности воздуха и отсутствие осадков приводят к достаточно быстрому истощению запасов влаги в почве, напочвенном покрове и в лесных горючих материалах — основных проводниках горения. Уровень теплообеспеченности территории позволяет оценить гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова (Селянинов, 1958). Оценка влагосодержания непосредственно в основных проводниках горения выполняется косвенно с применением комплексного показателя пожарной опасности, разработанного В. Г. Нестеровым в 1949 г. и модифицированного Ленинградским научно-исследовательским институтом лесного хозяйства (ЛенНИИЛХ) в показатель влажности ПВ-1 с дифференцированным учётом осадков (Коновалова, 1981).

В настоящее время связь энергетики пожаров севера Сибири с условиями пожароопасного сезона обсуждается в единичных публикациях. В развитие данной тематики в настоящем исследовании проверена гипотеза зависимости мощности теплоизлучения пожаров (FRP) от показателей ПВ-1 и ГТК для условий арктической зоны Сибири, включая северные части бассейнов рек Оби, Енисея, Хатанги, Лены, Яны, Индигирки, Колымы.

В работе рассматриваются следующие аспекты: вариативность среднемноголетних значений суммарной мощности теплоизлучения от пожара ($FRP_{\text{сум}}$) по материалам спутниковой съёмки; анализ зависимости $FRP_{\text{сум}}$ от показателя ПВ-1 и коэффициента ГТК; характерные диапазоны значений FRP для сезонов с минимальной и максимальной горимостью; пространственная экстраполяция динамики FRP в регионе за 23-летний период спутниковых наблюдений.

Район исследований

Исследование проводилось для территории арктической зоны Сибири ($64\text{--}74^\circ$ с. ш., $60\text{--}150^\circ$ в. д.). На территории исследования рассмотрены четыре (I–IV) субрегиона с интервалом по долготе $20\text{--}30^\circ$. Границы по долготе каждого субрегиона фактически совпадают с границами бассейнов крупных рек Сибири: Оби (субрегион I), Енисея с Хатангой (субрегион II), Лены (субрегион III), Яны/Индигирки/Колымы (субрегион IV) (*рис. 1*, см. с. 204). Бассейны рек в нашем случае можно рассматривать в качестве естественных границ, определяющих лесорастительные и локальные климатические особенности территорий.

Субрегион I находится в северной части бассейна реки Оби на севере Западной Сибири и охватывает площадь 619 тыс. км². Климат региона формируется под влиянием активной циклонической деятельности на протяжении всего года. Средняя температура в июле изменяется с севера на юг в диапазоне от 4 до 13 °С. Годовое количество осадков составляет

500–600 мм (<https://nationalatlas.ru/tom2/328-330.html>). Преобладающей растительностью является тундра, включая кустарничковые и моховые северные тундры, а также ерниковые мохово-лишайниковые южные тундры. Встречаются редколесья сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), средняя лесистость — от 5 до 20 % (<https://nationalatlas.ru/tom2/328-330.html>).

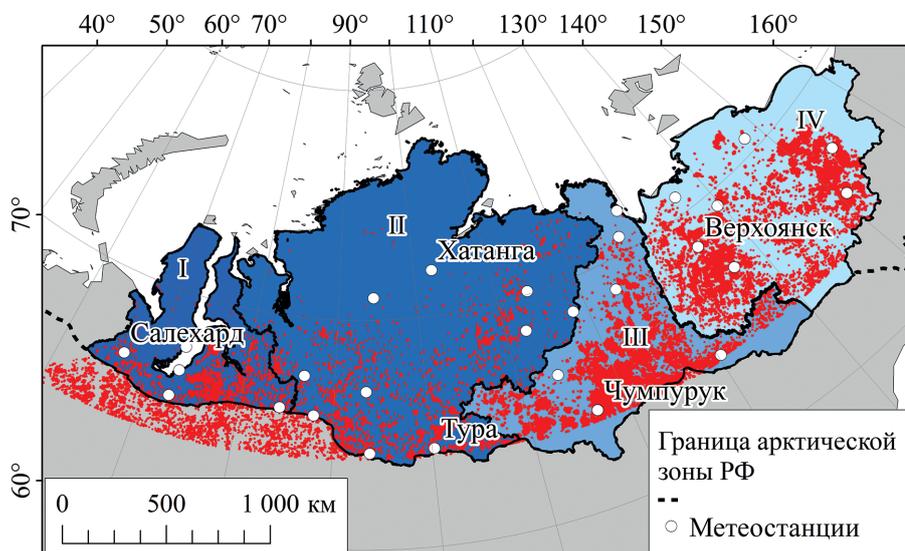


Рис. 1. Район исследования — арктическая территория Сибири. Красными точками отмечены пожары со значениями FRP, зафиксированные за период 2001–2023 гг. Пунктиром обозначена граница арктической зоны России. I–IV — рассматриваемые субрегионы

Субрегион II имеет площадь 521 тыс. км², располагается в северной части бассейнов рек Енисея и Хатанги. Климат — субарктический с высоким уровнем континентальности. Средняя температура июля составляет 10–14 °С, а годовое количество осадков находится в диапазоне от 400 до 1000 мм. В среднем показатель лесистости составляет 30 %, при этом преобладают редколесья лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) и лиственницы сибирской, а также ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.).

Субрегион III, площадь которого равна 626 тыс. км², расположен в северной части бассейна реки Лены, также имеет субарктический климат. Растительность представлена лиственничными редколесьями с примесью ели сибирской, лесистость варьирует от 20 до 60 %.

Субрегион IV охватывает площадь 975 тыс. км² и включает бассейны трёх рек: Яна, Индигирка, Колыма. Регион характеризуется субарктическим климатом. На данной территории с лесистостью от 20 до 40 % произрастают тундровые редколесья с лиственницей Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr).

Методика исследований

Вариативность мощности теплоизлучения пожаров по технологии FRP в арктической зоне Сибири анализировалась за период 2001–2023 гг. Были использованы стандартные продукты MOD14 спутниковых систем Terra и Aqua (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>) с данными в формате векторных точечных покрытий. Значения FRP определены как мощность теплоизлучения на один пиксель изображения и рассчитываются по формуле (Wooster, Zhang, 2004):

$$FRP = \frac{A_{pix} \sigma}{a} (L_4 - \bar{L}_4),$$

где A_{pix} — площадь пикселя MODIS; σ — постоянная Стефана–Больцмана, $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$; L_4 — энергетическая яркость (в $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$) термически активного пикселя (цели) в канале 21 радиометра MODIS ($\lambda \approx 4 \text{ мкм}$); \bar{L}_4 — энергетическая яркость фона в том же спектральном диапазоне; a — эмпирическая постоянная, $a = 3,0 \cdot 10^{-9} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{К}^{-4}$.

В работе предварительно рассчитывались $\text{FRP}_{\text{сум}}$ как сумма мощности теплоизлучения от всех пикселей пожаров отдельного субрегиона в течение пожароопасного сезона; суммарное количество пикселей N_{FRP} со значениями FRP для каждого субрегиона за каждый пожароопасный сезон; среднемноголетние значения $\text{FRP}_{\text{ср}}$ и стандартное отклонение SD (англ. Standard Deviation) по всем пикселям пожаров с привязкой к рассматриваемым субрегионам; спорадические максимумы, соответствующие условию $\text{FRP}_{\text{max}} \geq \text{FRP}_{\text{ср}} + 2\text{SD}$.

Сезоны, в которых интегральная энергетическая характеристика превышала средние значения $\text{FRP}_{\text{сум}}$ за период с 2001 по 2023 г., классифицировались как экстремальные пожароопасные сезоны. Сезоны с $\text{FRP}_{\text{сум}}$ ниже среднего были отнесены в категорию пожароопасных сезонов низкого уровня горимости. Количественная характеристика особенностей динамики FRP при пожарах в исследуемых субрегионах арктической зоны Сибири оценивалась на основе анализа гистограмм значений FRP с использованием стандартной функции Гаусса (Hawkins, 2014). Из рассмотрения были исключены нулевые значения FRP , а также спорадические выбросы; принимались во внимание только значения на уровне $\text{FRP} \leq \text{FRP}_{\text{ср}} + 3\text{SD}$. Далее вычислялась относительная частота выпадения значений FRP для каждого интервала. Обработка данных и визуализация результатов осуществлялись в среде R.

В работе рассчитывалось превышение (Δ , %) уровня средних значений $\text{FRP}_{\text{ср}}$ по отношению к диапазонам, характерным для сезонов низкой горимости:

$$\Delta = \frac{\text{FRP}_{\text{ср}_2} - \text{FRP}_{\text{ср}_1}}{\text{FRP}_{\text{ср}_1}} \times 100 \%,$$

где $\text{FRP}_{\text{ср}_1}$ — средние значения для сезонов низкой горимости; $\text{FRP}_{\text{ср}_2}$ — средние значения в условиях экстремальных пожароопасных сезонов.

Сведения о площадях и датах пожаров были получены из базы данных Института леса СО РАН, сформированной по результатам спутникового мониторинга в Сибири, за период 2001–2023 гг. (Пономарёв, Пономарёва, 2024). На временном интервале 2001–2023 гг. оценена фактическая горимость в каждом рассматриваемом субрегионе (Мокеев, 1965) как

$$\gamma = \left(S_{\text{лп}} / S_{\text{лес}} \right) \times 100 \%,$$

где γ — относительная горимость, %; $S_{\text{лп}}$ — суммарная за каждый сезон площадь лесных пожаров; $S_{\text{лес}}$ — площадь, покрытая растительностью, включая тундры.

Используя многолетние ряды метеоданных, анализировали вариации ГТК Селянинова (Селянинов, 1958). Всего обработаны материалы по 21 метеостанции: 3, 6, 5 и 7 метеостанций для исследуемых субрегионов I–IV соответственно. Обработывались данные для периода май–сентябрь пожароопасных периодов 2001–2023 гг. В работе рассматривалось среднее $\text{ГТК}_{\text{ср}}$ за летний период каждого пожароопасного сезона.

Для восстановления динамики влагосодержания лесных горючих материалов как косвенной характеристики пожароопасного состояния использовали показатель влажности ПВ-1 (Коновалова, 1981):

$$\text{ПВ}_n = \left[\text{ПВ}_{n-1} + t_{n-1} (t_{n-1} - \tau_{n-1}) \right] K_n \text{ при } t_{n-1} > 0,$$

где ПВ_n — показатель влажности на утро текущего дня; ПВ_{n-1} — показатель влажности на утро предшествующего дня; t_{n-1} и τ_{n-1} — температура воздуха и точки росы в предшествующий день, °C; K_n — коэффициент учёта осадков. В работе рассматривалось среднее значение $\text{ПВ-1}_{\text{ср}}$ и суммарное значение $\text{ПВ-1}_{\text{сум}}$ за пожароопасный сезон.

Методом корреляционного анализа оценивали уровень связи между параметрами $FRP_{\text{сум}}$, N_{FRP} , $ГТК_{\text{ср}}$, $ПВ-1_{\text{ср}}$ и $ПВ-1_{\text{сум}}$. Для повышения уровня достоверности результатов корреляционного анализа учитывались только фактические данные о пожарах в буферной зоне радиусом <100 км от метеостанций.

Рассматривали коэффициент корреляции r -Пирсона, который является мерой прямолинейной связи между переменными:

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot \sum(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}},$$

где x_i, y_i — i -е значения ряда данных; \bar{x} — среднее значение для рядов $FRP_{\text{сум}}/N_{\text{FRP}}$; \bar{y} — среднее для показателей $ПВ-1/ГТК$.

Дополнительно динамику пространственного распределения $FRP_{\text{ср}}$ и $FRP_{\text{сум}}$ рассмотрели на основе экстраполяции в масштабе регулярной сети с размером ячейки $0,5 \times 0,5^\circ$, построенной на территорию арктической зоны Сибири с использованием инструмента «Зональная статистика» продукта QGIS (англ. Quantum Geographic Information System), версия 3.32 (<https://www.qgis.org/>).

Результаты и обсуждение

Зафиксировано, что среднемноголетние площади пожаров варьировали от 1,5 до 5,2 тыс. км² за сезон. Средние многолетние характеристики обобщены в границах рассматриваемых субрегионов (табл. 1). Фиксируемое количество пикселей со значениями FRP в год варьирует в зависимости от напряжённости пожароопасного сезона и значительно меняется на градиенте долготы. Диапазон значений FRP, горимость и ПВ-1 в арктической зоне Сибири возрастают с запада на восток, при этом параметр ГТК убывает в этом же направлении. Наименьшее N_{FRP} наблюдается в субрегионах I и II (~5300 пикселей/год без учёта спорадических экстремумов), в то время как наибольшее количество N_{FRP} зафиксировано в субрегионах III и IV (>11 000 и >9500 соответственно).

Таблица 1. Среднемноголетние значения исследуемых параметров за период 2001–2023 гг.

| Субрегион | γ (горимость), % | $FRP_{\text{сум}}, \times 10^5$ МВт | FRP_{max} , МВт | $ГТК_{\text{ср}}$, ед. | $ПВ-1_{\text{ср}}$, ед. |
|-----------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| I | $0,29 \pm 0,17$ | $1,8 \pm 0,7$ | 140 | $1,07 \pm 0,14$ | 471 ± 81 |
| II | $0,22 \pm 0,13$ | $2,7 \pm 1,7$ | 250 | $1,20 \pm 0,19$ | 755 ± 160 |
| III | $0,67 \pm 0,44$ | $10,7 \pm 7,5$ | 529 | $0,81 \pm 0,14$ | 777 ± 125 |
| IV | $0,62 \pm 0,64$ | $6,8 \pm 4,9$ | 367 | $0,63 \pm 0,09$ | 1070 ± 139 |

Экстремальные пожарные события в регионе повторяются с периодом $T = 5 \pm 2$ года, при этом в такие сезоны характерен значительный рост площади пожаров, достигающий 2–4 раз в сравнении со среднемноголетними нормами (Третьяков, Пономарёв, 2023). В течение исследуемого 23-летнего периода экстремальные пожароопасные сезоны в субрегионе I фиксировались 6 раз, во II и III — по 7 раз, в субрегионе IV — 5 раз.

Можно констатировать (см. табл. 1), что исследуемый субрегион III с преобладанием лиственных лесов и наибольшей лесистостью (до 60 % площади) отличается наивысшим уровнем горимости и высокой мощностью теплоизлучения от пожаров. В то же время для пожаров субрегиона IV характерна наибольшая пожарная опасность по условиям погоды (по методике ПВ-1). Вариативность значений ГТК указывает на разнообразие климатических условий в регионе и повышение уровня засушливости с запада на восток.

Гистограммы FRP (рис. 2, см. с. 207) соответствуют квазинормальному распределению и аппроксимируются функцией Гаусса (Hawkins, 2014). Наибольший уровень $FRP_{\text{ср}}$ (пун-

ктирная линия, см. *рис. 2*) зафиксирован в субрегионе III ($59,38 \pm 88,50$ МВт) и субрегионе IV ($49,65 \pm 76,46$ МВт). В западных исследуемых субрегионах I и II FRP_{ср} на пиксель составляет $27,38 \pm 38,21$ и $39,56 \pm 49,62$ МВт соответственно. Высокая дисперсия FRP в исследуемых субрегионах связана с условиями возникновения конкретных случаев пожаров в различные пожароопасные сезоны, что определяется как вероятностью источников возгорания (например, молний при сухих грозах), так и степенью пожарной зрелости лесных горючих материалов в районе возникновения пожара (Иванов и др., 2023). Полученные результаты в целом согласуются с результатами, представленными в литературе для пожаров в бореальных лесах Евразии и Северной Америки (FRP_{ср} ~ 40...80 МВт) (Wooster, Zhang, 2004).

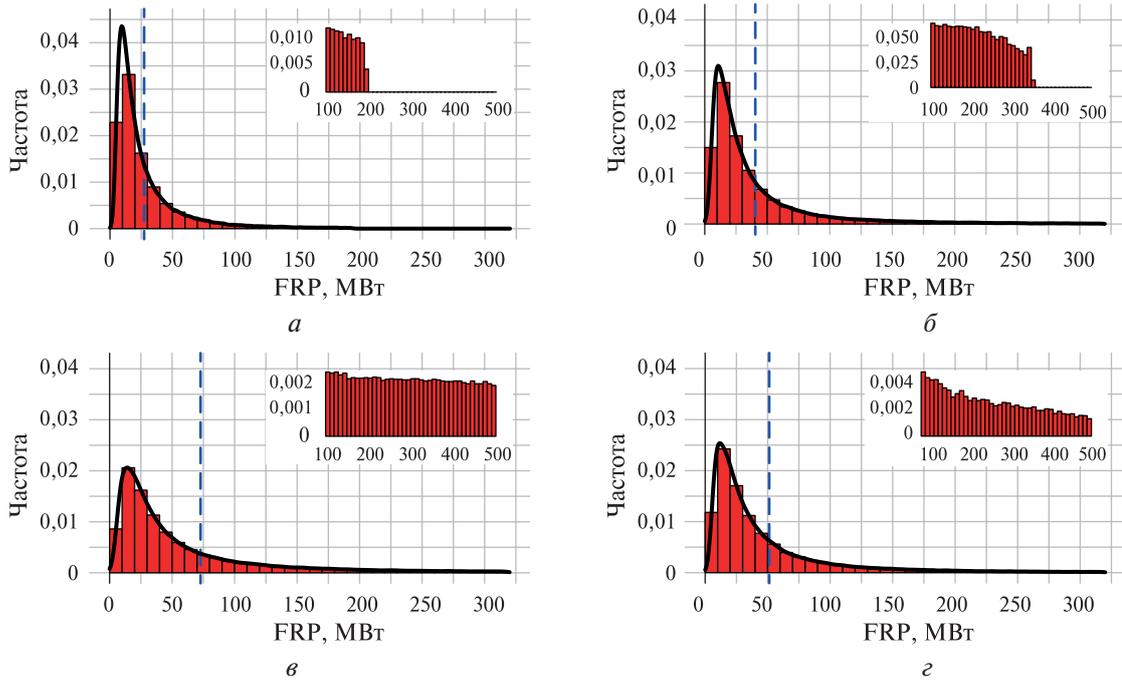


Рис. 2. Частота выпадения значений FRP в заданных диапазонах в субрегионах: а — I; б — II; в — III; г — IV. Пунктирной линией отмечено FRP_{ср} для пожаров субрегиона

Низкие значения FRP (10–20 МВт/пиксель) характерны для субрегионов I и II с преобладанием тундровой растительности. В субрегионах III и IV отмечается увеличение частоты более высоких значений FRP. В субрегионе II наблюдается наименьшая частота выпадения значений FRP в интервале 0,1–20,0 МВт, что, вероятно, связано с преобладанием лиственных редколесий на данной территории. Эта территория характеризуется мощностью теплоизлучения, на 20–25 % превышающей средние значения FRP в других вариантах растительности (Забродин, Пономарёв, 2024; Швецов, Пономарев, 2015).

Корреляционная матрица (*табл. 2*) констатирует обратную связь между ГТК_{ср} и показателями FRP_{сум} и N_{FRP} на уровне $r = -0,5$ ($p < 0,05$). Таким образом, снижение ГТК с запада на восток (см. *табл. 1*) определяет повышение радиационной мощности пожаров (*рис. 3б*, см. с. 208). Положительная корреляция между ПВ-1 и показателями FRP_{сум} и N_{FRP} ($r = 0,7$ при $p < 0,05$) отражает значимое влияние условий погоды на рост энергетических характеристик пожаров (см. *рис. 3а*). Наиболее значительно эта связь проявляется для пожаров в условиях субрегионов II, III, IV (см. *табл. 2*).

Восточная часть арктической зоны Сибири (субрегионы III и IV) характеризуются значениями FRP_{max} = 529 МВт (субрегион III) и FRP_{max} = 367 МВт (субрегион IV), вдвое превышающими характерные максимумы западной части арктической зоны Сибири (140 и 250 МВт для субрегионов I и II соответственно) (см. *табл. 1*). Помимо уровня тепловлагообеспеченности этому способствует и более высокая доля (в %) лесистости восточных субреги-

онов. В целом более 90 % всех зафиксированных значений FRP соответствуют условию $FRP < FRP_{\max}$. В среднем за пожароопасный сезон в арктической зоне Сибири доля пикселей с $FRP \geq FRP_{\max}$ не превышает ~8 %.

Таблица 2. Корреляционная матрица для исследуемых параметров

| Субрегион | Параметр | ГТК _{ср} | ПВ-1 _{ср} | ПВ-1 _{сум} |
|-----------|--------------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| I | FRP _{сум} | -0,40 | 0,55 | 0,55 |
| | N _{FRP} | -0,41 | 0,58 | 0,58 |
| II | FRP _{сум} | -0,55 | 0,74 | 0,74 |
| | N _{FRP} | -0,59 | 0,79 | 0,79 |
| III | FRP _{сум} | -0,52 | 0,67 | 0,67 |
| | N _{FRP} | -0,54 | 0,71 | 0,70 |
| IV | FRP _{сум} | -0,44 | 0,76 | 0,43 |
| | N _{FRP} | -0,51 | 0,78 | 0,58 |

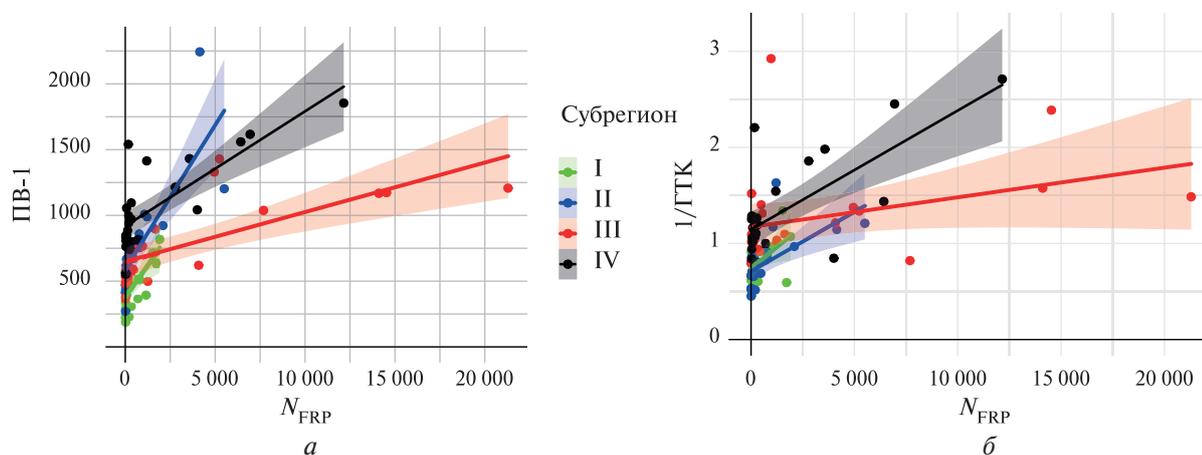


Рис. 3. Линейная аппроксимация связи между значениями N_{FRP} и показателем ПВ-1 (а), $1/ГТК$ (б). Точки соответствуют данным за один пожароопасный сезон

В условиях экстремальных пожароопасных сезонов зафиксировано значимое превышение (Δ , %) уровня средних значений $FRP_{ср}$ по отношению к диапазонам, характерным для сезонов низкой горимости. В западной и центральной части рассматриваемой территории Δ составляло ~11,7 %, а $FRP_{ср}$ возросло с 21,4 до 23,9 МВт в субрегионе I и с 30,0 до 33,5 МВт в субрегионе II (табл. 3). В субрегионе III при росте $FRP_{ср}$ с 49,9 до 56,4 МВт в экстремальные сезоны относительное превышение Δ достигло ~13,0 % (табл. 3). Незначительно ($\Delta \sim 3,2$ %) среднее значение $FRP_{ср}$ менялось только в условиях субрегиона IV с 40,3 до 41,6 МВт (табл. 3).

Результаты не противоречат данным аналогичных исследований, проведённых для других регионов и растительных условий Сибири (Швецов, Пономарев, 2015).

За время 2012–2023 гг. относительно периода 2001–2011 гг. была зафиксирована положительная динамика $FRP_{ср}$ и $FRP_{сум}$ на 21–42 % территории (см. табл. 3, рис. 4, см. с. 209). Снижение этих параметров было характерно не более чем для 6–23 % территории субрегионов. Наибольшая положительная динамика $FRP_{сум}$ наблюдалась в субрегионе III, где рассмотренные показатели FRP увеличились на ~56 % территории. В работе (Ponomarev et al., 2023) рост $FRP_{ср}$ фиксировался на ~30 % территории Сибири, что согласуется с полученными нами результатами, детализированными по территории исследования.

Таблица 3. Доля территории с положительной и отрицательной динамикой мощности теплоизлучения от пожаров (для $FRP_{\text{сум}}$ и $FRP_{\text{ср}}$) и оценка относительного роста средних значений для условий экстремальных пожароопасных сезонов (Δ , %)

| Субрегион | Доля территории с положительной динамикой FRP, % | | Доля территории с отрицательной динамикой FRP, % | | Δ , % |
|-----------|--|-------------------|--|-------------------|--------------|
| | $FRP_{\text{сум}}$ | $FRP_{\text{ср}}$ | $FRP_{\text{сум}}$ | $FRP_{\text{ср}}$ | |
| I | 39 | 39 | 14 | 15 | 11,7 |
| II | 21 | 21 | 6 | 8 | 11,7 |
| III | 56 | 52 | 13 | 17 | 13,0 |
| IV | 42 | 39 | 23 | 26 | 3,2 |

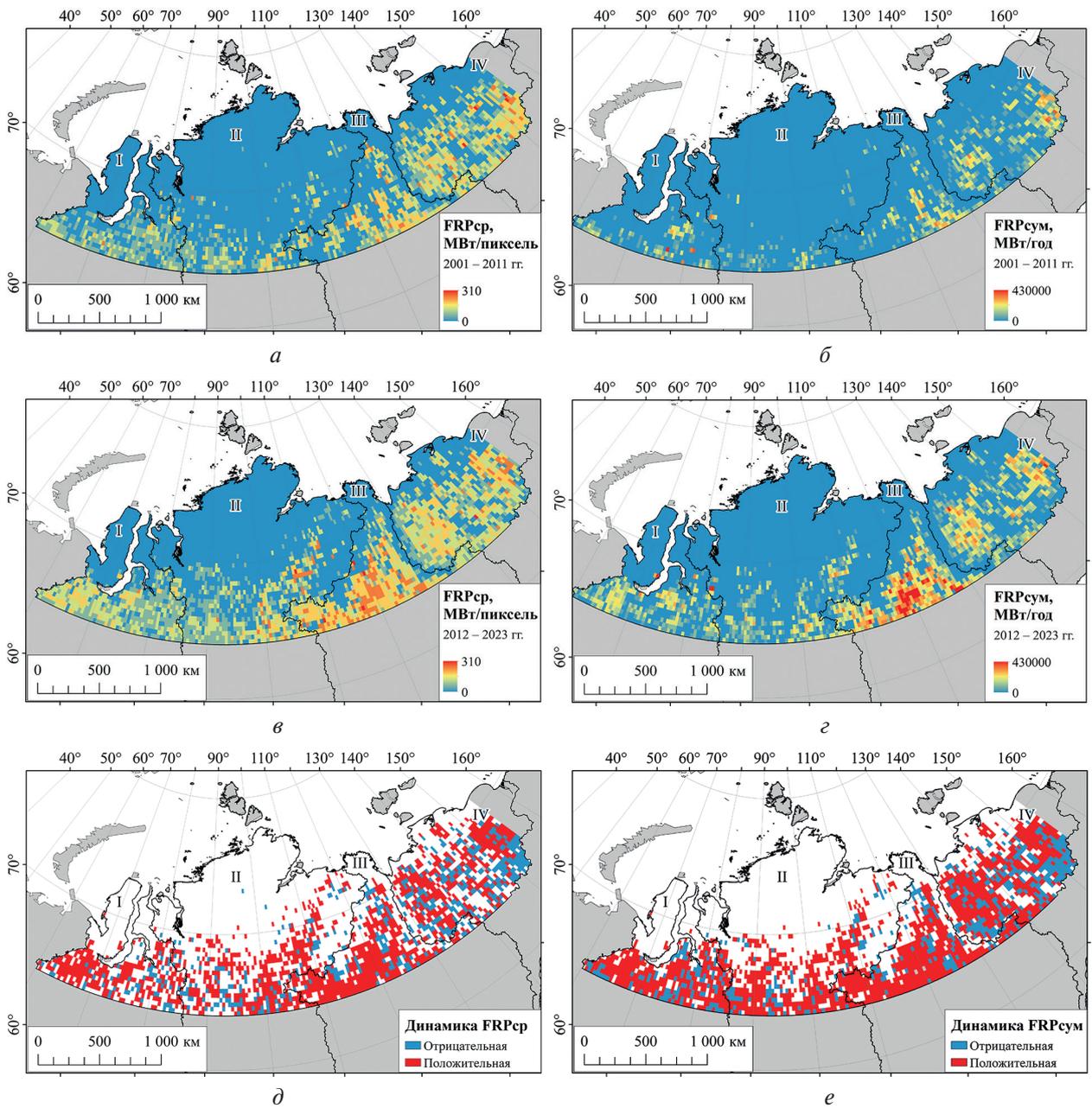


Рис. 4. Пространственная интерполяция регистрируемого теплоизлучения от пожаров. Распределение $FRP_{\text{ср}}$ за 2001–2011 гг. (а) и 2012–2023 гг. (в) и среднегодовой суммы $FRP_{\text{сум}}$ за 2001–2011 гг. (б) и 2012–2023 гг. (г). Пространственная динамика $FRP_{\text{ср}}$ (д) и $FRP_{\text{сум}}$ (е) на рассмотренных интервалах

На значительной части территории (~50 %), расположенной выше 70° с. ш., изменений FRP_{cp} и $FRP_{сум}$ за рассматриваемый период не зафиксировано, что объясняется спецификой распределения растительного покрова, режимов увлажнения и, как следствие, отсутствием пожаров в современных климатических условиях на данных участках (см. рис. 4д, е, белый цвет). Однако территории, где пожарные события в настоящее время уже регулярны, в большинстве характеризуются положительной динамикой FRP_{cp} и $FRP_{сум}$ (см. рис. 4д, е, красный цвет).

Заключение

Обобщая пространственное распределение динамики теплоизлучения от пожаров за 2001–2023 гг., можно констатировать, что значительная часть арктической зоны Сибири характеризуется положительным трендом горимости и теплоизлучения от пожаров.

В рассмотренных субрегионах для современных условий количественно описан уровень связи между $ГТК_{cp}$ и показателями FRP ($r = -0,5$ при $p < 0,05$) и между показателями ПВ-1 и FRP ($r = 0,7$ при $p < 0,05$). Таким образом, снижение $ГТК$ с запада на восток определяет увеличение радиационной мощности пожаров, при этом повышение уровня пожарной опасности по условиям погоды также закономерно приводит к росту интенсивности пожаров, что наиболее ярко выражено для данных об энергетике пожаров в условиях восточной части арктической зоны Сибири.

Можно сделать вывод, что в современных климатических условиях в арктической зоне Сибири наблюдается рост энергетических характеристик пожаров на 21–56 % территории, а снижение — на 6–23 % территории. По всей вероятности, рост обусловлен климатическими изменениями, влияющими на интенсивность процессов сушки, пирологическую зрелость горючих материалов и вероятность возникновения возгораний.

Показано, что FRP_{cp} в условиях экстремальных пожароопасных сезонов увеличивается на $\Delta \sim 11,7...13,0$ % на большей части арктической зоны Сибири. Можно предполагать, что дальнейшие изменения климата в регионе будут провоцировать усиление роли высокоинтенсивных пожаров, а следовательно, повышение тяжести послепожарных эффектов.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания FWES-2024-0027 (Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН» (ФИЦ КНЦ СО РАН)). Использованы материалы спутникового мониторинга, полученные в Центре коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН в рамках государственного задания № FWES-2024-0023.

Литература

1. Алексеев Г. В., Ананичева М. Д., Анисимов О. А. и др. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет, 2014. Т. 3. 93 с.
2. Забродин А. Н., Пономарёв Е. И. Вариативность интегрального теплоизлучения пожаров в условиях лиственничников Сибири // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 166–176. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-166-176.
3. Иванов В. А., Пономарев Е. И., Иванова Г. А., Мальканова А. В. Грозы и лесные пожары в современных климатических условиях Средней Сибири // Метеорология и гидрология. 2023. № 7. С. 102–113. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-7-102-113.
4. Коновалова Н. Ф. Определение пожарной опасности в лесу: методич. рекомендации. 4-е изд. Л.: ЛенНИИЛХ, 1981. 50 с.
5. Лупян Е. А., Стыщенко Ф. В., Сенько К. С. и др. Оценка площадей пожаров на основе детектирования активного горения с использованием данных шестой коллекции приборов MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 178–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.

6. Мальканова А. В., Пономарев Е. И. Пространственно-временная изменчивость характеристик горимости лесов в Сибири // Метеорология и гидрология. 2025. № 5. С. 95–110. DOI: 10.52002/0130-2906-2025-5-95-110.
7. Мокеев Г. А. Влияние природных и экономических условий на горимость лесов и охрану их от пожаров // Современные вопросы охраны лесов от пожаров и борьбы с ними. М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1965. С. 26–37.
8. Пономарёв Е. И., Пономарёва Т. В. Пожарное воздействие в криолитозоне Сибири за период 1996–2023 гг. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № RU 2024623184. Рег. 18.07.2024.
9. Пономарев Е. И., Скоробогатова А. С., Пономарева Т. В. Горимость лесов Сибири и межсезонные вариации уровня тепло- и влагообеспеченности // Метеорология и гидрология. 2018. № 7. С. 45–55.
10. Селянинов Г. Т. Происхождение и динамика засух // Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай. Л.: Гидрометеиздат, 1958. С. 5–30.
11. Третьяков П. Д., Пономарёв Е. И. Горимость арктической зоны Сибири в условиях климатических изменений XX–начала XXI вв. // Сибирский лесной журн. 2023. № 6. С. 17–31. DOI: 10.15372/SJFS20230603.
12. Швецов Е. Г., Пономарев Е. И. Оценка влияния внешних условий на мощность теплоизлучения от лесных пожаров по данным спутникового мониторинга // Сибирский эколог. журн. 2015. Т. 22. № 3. С. 413–421. DOI: 10.15372/SEJ20150308.
13. Conard S. G., Ponomarev E. Fire in the north: The 2020 Siberian fire season // Wildfire. 2020. V. 29. No. 4. P. 26–32.
14. Descals A., Gaveau D. L., Verger A. et al. Unprecedented fire activity above the Arctic Circle linked to rising temperatures // Science. 2022. V. 378. No. 6619. P. 532–537. DOI: 10.1126/science.abn9768.
15. Hawkins D. Biomeasurement: A student's guide to biological statistics. 3rd ed. Oxford, UK; N.Y., USA: Oxford University Press, 2014. 333 p.
16. Hayasaka H. Rare and extreme wildland fire in Sakha in 2021 // Atmosphere. 2021. V. 12. No. 12. Article 1572. 14 p. <https://doi.org/10.3390/atmos12121572>.
17. Kharuk V. I., Dvinskaya M. L., Im S. T. et al. Wildfires in the Siberian Arctic // Fire. 2022. V. 5. No. 4. Article 106. 15 p. <https://doi.org/10.3390/fire5040106>.
18. Ponomarev E. I., Zabrodin A. N., Shvetsov E. G., Ponomareva T. V. Wildfire intensity and fire emissions in Siberia // Fire. 2023. V. 6. No. 7. Article 246. 15 p. <https://doi.org/10.3390/fire6070246>.
19. The Global Climate 2011–2020: A decade of accelerating climate change. WMO-No. 1338. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2023. 56 p.
20. Wooster M. J., Zhang Y. H. Boreal forest fires burn less intensely in Russia than in North America // Geophysical Research Letters. 2004. V. 31. No. 20. Article L20505. 3 p. <https://doi.org/10.1029/2004GL020805>.
21. Zabrodin A. N., Ponomarev E. I. Assessment of dependence between the degree of fire impact on vegetation and the fire radiative power // Cosmic Research. 2024. V. 62. Iss. Suppl. 1. P. S165–S171. DOI: 10.1134/S0010952524601130.

Fire radiative power in the Arctic zone of Siberia depending on weather conditions

A. V. Malkanova, P. D. Tretyakov, E. I. Ponomarev

*Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia
E-mails: malkanova@ksc.krasn.ru, ptretyakov99@mail.ru, evg@ksc.krasn.ru
Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia*

We have examined the variability of wildfire radiation using the FRP (Fire Radiative Power) technology for fires in the Arctic zone of Siberia (64–74° N, 60–150° E). The work was performed based on the standard MOD14 product of the Terra and Aqua satellite systems for the period 2001–2023. Maximum radiation power resulting from fires was recorded in the eastern part of the Arctic zone where larch stands dominate. These values exceed twice the FRP values observed in the subregions of the western Siberian Arctic zone. In fire seasons with extreme weather conditions, the average FRP

per pixel is 11.7–13.0 % higher than it is in seasons with low fire hazard in most of the studied subregions. The correlation between the FRP and the level of weather fire danger PV-1 (Moisture Index), as well as the interseasonal dynamics of the hydrothermal coefficient (HTC), were examined. PV-1 has a closer relationship with FRP ($r = 0.7$ at $p < 0.05$) than HTC with FRP ($r = -0.5$ at $p < 0.05$). Spatial extrapolation by means of GIS indicates that, in the period observed, positive dynamics of fire radiative power is typical for 21–56 % of the Arctic zone of Siberia, while the eastern part of the region is characterized by the greatest spread of FRP growth, up to 42–56 % of the studied territory.

Keywords: Arctic zone of Siberia, fire radiation power, FRP, hydrothermal coefficient, HTC, PV-1, relative burned area

Accepted: 19.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-202-213

References

1. Alekseev G. V., Ananicheva M. D., Anisimov O. A. et al., *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences in the territory of the Russian Federation), Roshydromet, 2014, V. 3, 93 p. (in Russian).
2. Zabrodin A. N., Ponomarev E. I., Variability of fire radiative power under the conditions of burning in larch forests of Siberia, *Cosmic Research*, 2024, V. 62, Iss. Suppl. 1, pp. S172–S179, DOI: 10.1134/S0010952524601129.
3. Ivanov V. A., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Malkanova A. V., Lightning and forest fires under modern climatic conditions of Central Siberia, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2023, V. 48, No. 7, pp. 630–638, DOI: 10.3103/S1068373923070105.
4. Konovalova N. F., *Opreделение požarnoi opasnosti v lesu: metodicheskie rekomendatsii* (Determining the fire hazard in the forest: Guidelines), 4th ed., Leningrad: LenNIILKH, 1981, 50 p. (in Russian).
5. Loupian E. A., Stytsenko F. V., Senko K. S. et al., Burnt area assessment using MODIS Collection 6 active fire data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 4, pp. 178–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
6. Malkanova A. V., Ponomarev E. I., Spatiotemporal variability of forest burning in Siberia, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2025, No. 5, pp. 95–110, DOI: 10.52002/0130-2906-2025-5-95-110.
7. Mokeev G. A., Influence of natural and economic conditions on forest flammability and protection from fires, In: *Sovremennyye voprosy ohrany lesov ot požarov i bor'by s nimi* (Modern issues of forest fire protection and fire control), Moscow: Izd. "Lesnaya promyshlennost'", 1965, pp. 26–37 (in Russian).
8. Ponomarev E. I., Ponomareva T. V., *Požarnoe vozdeistvie v kriolitozone Sibiri za period 1996–2023 gg.* (Fire impact in the cryolithozone of Siberia for the period 1996–2023), Certificate of state registration of the database No. 2024623184 (RU), Reg. 18.07.2024 (in Russian).
9. Ponomarev E. I., Skorobogatova A. S., Ponomareva T. V., Wildfire occurrence in Siberia and seasonal variations in heat and moisture supply, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2018, V. 43, No. 7, pp. 456–463, DOI: 10.3103/S1068373918070051.
10. Selyaninov G. T., Origin and dynamics of droughts, In: *Zasuhi v SSSR, ih proiskhozhdenie, povtoryaemost' i vliyanie na urozhai* (Droughts in the USSR, their origin, recurrence and impact on harvest), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1958, pp. 5–30 (in Russian).
11. Tretyakov P. D., Ponomarev E. I., Wildfires of the Arctic zone of Siberia under the conditions of climatic changes of the XX–early XXI centuries, *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2023, No. 6, pp. 17–31 (in Russian), DOI: 10.15372/SJFS20230603.
12. Shvetsov E. G., Ponomarev E. I., Estimating the influence of external environmental factors on fire radiative power using satellite imagery, *Contemporary Problems of Ecology*, 2015, V. 8, No. 3, pp. 337–343, DOI: 10.1134/S1995425515030142.
13. Conard S. G., Ponomarev E., Fire in the north: The 2020 Siberian fire season, *Wildfire*, 2020, V. 29, No. 4, pp. 26–32.
14. Descals A., Gaveau D. L., Verger A. et al., Unprecedented fire activity above the Arctic Circle linked to rising temperatures, *Science*, 2022, V. 378, No. 6619, pp. 532–537, DOI: 10.1126/science.abn9768.
15. Hawkins D., *Biomeasurement: A student's guide to biological statistics*, 3rd ed., Oxford, UK; New York, USA: Oxford University Press, 2014, 333 p.
16. Hayasaka H., Rare and extreme wildland fire in Sakha in 2021, *Atmosphere*, 2021, V. 12, No. 12, Article 1572, 14 p., <https://doi.org/10.3390/atmos12121572>.

17. Kharuk V. I., Dvinskaya M. L., Im S. T. et al., Wildfires in the Siberian Arctic, *Fire*, 2022, V. 5, No. 4, Article 106, 15 p., <https://doi.org/10.3390/fire5040106>.
18. Ponomarev E. I., Zabrodin A. N., Shvetsov E. G., Ponomareva T. V., Wildfire intensity and fire emissions in Siberia, *Fire*, 2023, V. 6, No. 7, Article 246, 15 p., <https://doi.org/10.3390/fire6070246>.
19. *The Global Climate 2011–2020: A decade of accelerating climate change*, WMO-No. 1338, Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2023, 56 p.
20. Wooster M. J., Zhang Y. H., Boreal forest fires burn less intensely in Russia than in North America, *Geophysical Research Letters*, 2004, V. 31, No. 20, Article L20505, 3 p., <https://doi.org/10.1029/2004GL020805>.
21. Zabrodin A. N., Ponomarev E. I., Assessment of dependence between the degree of fire impact on vegetation and the fire radiative power, *Cosmic Research*, 2024, V. 62, Iss. Suppl. 1, pp. S165–S171, DOI: 10.1134/S0010952524601130.