

УДК 630.181

ГОРИМОСТЬ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ СИБИРИ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ XX – НАЧАЛА XXI вв.

П. Д. Третьяков^{1,2}, Е. И. Пономарёв^{1,2}

¹ Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН 660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

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

E-mail: ptretyakov99@mail.ru, evg@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 08.06.2023 г.

Пожары растительности на территории арктической зоны Сибири (64–74° с. ш., 60–150° в. д.) изучались в условиях наблюдаемых климатических изменений на рубеже XX – начала XXI вв. На территории исследования на градиенте долготы рассматривались четыре сектора с интервалом 20°, таким образом, что границы по долготе для каждого сектора совпадали с границами бассейнов крупных рек – Оби, Енисея (с Хатангой), Лены, Яны, Индигирки, Колымы. В качестве исходных данных использованы банк пожаров Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, собранный по материалам спутникового мониторинга в 1996–2022 гг., а также результаты анализа метеорологической информации на территорию Сибири из открытых каталогов за более чем 100-летний интервал наблюдений (1900–2022 гг.). В работе проанализирована пространственно-временная вариация основных метеорологических характеристик, включая температуру воздуха, количество осадков, грозовую активность с детализацией на градиенте долготы. Дополнительно восстановлены тренды тепло- и влагообеспеченности и длительности пожароопасного периода. Выявлены относительные аномалии основных метеорологических факторов на временном интервале 2000–2022 гг. в сравнении со среднестатистическими нормами 100-летнего периода и относительная скорость их изменения в современном климате. Для рассмотренных показателей выполнена геопространственная интерполяция средствами геоинформационных систем. На основе корреляционного анализа зафиксирована степень связи между рассматриваемыми факторами и показателями горимости в арктической зоне Сибири в 2002–2022 гг.

Ключевые слова: пожары растительности, спутниковые данные, метеорологическая информация, пространственная интерполяция, гидротермический коэффициент, тренды.

DOI: 10.15372/SJFS20230603

ВВЕДЕНИЕ

Тема горимости лесов и значимости послепожарных эффектов в Сибири не теряет актуальности на фоне прогнозируемых изменений климата. Практика последних лет показывает, что периодические повторения экстремальных пожарных сезонов и массовых лесных пожаров в Сибири вызывают широкий интерес не только в научном плане или в области практических решений, но и приобретает общественный резонанс. Одна из активно обсуждаемых в последние годы тем – смещение пожаров в северные широты, горимость северной части бо-

реальных лесов и тундры Сибири, что особенно ярко проявилось в пожароопасный сезон 2020 г. (Conard, Ponomarev, 2020; Witze, 2020; Descals et al., 2022; Kharuk et al., 2022). И хотя повторяемость экстремальных событий в зоне Арктики укладывается в общую цикличность пожарных сезонов Сибири (Conard, Ponomarev, 2020), вероятно, спорадические экстремумы горимости северных территорий будут иметь все большие масштабы в перспективе.

При всем разнообразии лесорастительных условий пожарные режимы отдельных территорий Сибири (Ivanova, 1998; Валендик, Иванова, 2001) определяются климатом и особенностями

распределения основных метеорологических характеристик в течение пожароопасного периода. В частности, как следует из многолетних наблюдений, наиболее экстремальные пожарные события в Сибири развиваются в условиях устойчивых антициклонов и дефицита осадков (Ivanova, 1998; Flannigan et al., 2009; Валендик и др., 2014; Пономарев и др., 2018; Ponomarev et al., 2018; Hayasaka, 2021). Констатируемые многолетние вариации пожаров и пожарного воздействия на леса Сибири (Пономарев и др., 2018; Ponomarev et al., 2018; Hayasaka, 2021; Барталев, Стыценко, 2021) также в целом согласуются с описанными статистически достоверными режимами короткопериодной изменчивости климатической системы, которые имеют две высокочастотных составляющих с периодами 2–8 и 20–60 лет (Бышев и др., 2014; Byshev et al., 2014).

Потенциальные изменения климата, в частности рост температуры летнего периода, дефицит или перераспределение осадков (как в пространственном плане, так и во времени в течение сезона) способны существенно влиять на частоту возникновения пожаров растительности в Сибири и на арктической части ее территории. При этом для Арктики Сибири, относимой к зоне исключительно спутникового мониторинга пожаров, будет возрастать риск увеличения площадей пожаров при условии отсутствия системы контроля, предупреждения и тушения пожаров.

Современная оценка воздействий изменения климата (Arctic..., 2005) показывает тенденцию роста годовой температуры в Арктике, достигающую в отдельных районах Аляски, Северной Канады и Сибири ~ 3 °C за 30-летний период (1971–2000 гг.) (Ciavarella et al., 2021). Хотя скорость изменения температуры для разных субрегионов различна, а для некоторых территорий фиксируется понижение температуры воздуха, общий тренд для Арктики за последние несколько десятилетий демонстрирует потепление (Field et al., 2014), почти в 2 раза превышающее средние темпы роста температуры на планете (Цатуров, 2012). Глобальные климатические изменения, представленные в сценариях IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) (Field et al., 2014), могут провоцировать повышение вероятности возникновения пожаров и их частоты, а кроме того – и интенсивности пожаров, что может значительно усилить общее негативное воздействие на экосистемы лесов и притундровых регионов Сибири (Барталев, Стыценко, 2021; Hayasaka, 2021). Последствия и эффекты от вероятного и уже наблюдаемого

смещения пожаров в зону Арктики (Descals et al., 2022; Xu et al., 2022) следует анализировать с точки зрения долговременных проявлений пожарного воздействия, отмеченных для различных компонентов экосистем криолитозоны – растительных покровов и почвы (Knorr et al., 2019; Ponomarev et al., 2020; Kirilyanov et al., 2020; Пономарева и др., 2022; Dymov et al., 2023).

Можно предполагать, что изменения локального и глобального климата будут все в большей степени провоцировать увеличение длительности вегетационного и пожароопасного периодов, смещение временной границы схода снега весной, повышение средних температур летнего периода, изменение циркуляции атмосферы с локальным перераспределением осадков и грозовой активности (Flannigan et al., 2009; Школьник и др., 2012; Shkol'nik et al., 2012; Валендик и др., 2014; Бышев и др., 2014; Byshev et al., 2014; Шерстюков Б. Г., Шерстюков А. Б., 2014; Sherstyukov B. G., Sherstyukov A. B., 2014; Иванов и др., 2023; Ivanov et al., 2023), определяя и рост интенсивности пожаров (Ponomarev et al., 2023), и в целом ужесточение пожарных режимов Сибири (Швиденко, Щепашенко, 2013; Shvidenko, Shchepaschenko, 2013; Пономарев и др., 2018; Ponomarev et al., 2018; Барталев, Стыценко, 2021).

В то же время количественные результаты связи межсезонных вариаций климата и изменений пожарных режимов современности на уровне отдельных субрегионов Сибири и Арктики обсуждаются в единичных публикациях (Шерстюков Б. Г., Шерстюков А. Б., 2014; Sherstyukov B. G., Sherstyukov A. B., 2014; Бахнина, Носкова, 2021; Hayasaka, 2021; Kharuk et al., 2022). В этой связи актуальны исследования, выявляющие закономерности локальных климатических изменений, что необходимо для понимания и прогнозирования сценариев изменения активности пожаров в зоне Арктики для минимизации вероятных негативных последствий.

Цель данной работы – провести многофакторный анализ изменения метеорологических параметров и установить их связь с горимостью арктической зоны Сибири. Были рассмотрены следующие аспекты проблемы: 1) долговременные тренды температуры воздуха вегетационного периода и осадков в отдельных субрегионах арктической зоны, 2) относительные аномалии основных метеорологических факторов на временном интервале 2000–2022 г. в сравнении со среднестатистическими нормами 100-летнего периода и относительная скорость их измене-

ния в современном климате, 3) долговременные тренды уровня тепло- и влагообеспеченности на градиенте долготы арктической зоны (60–150° в. д.).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований. В работе выполнен геопространственный анализ метеорологических характеристик и горимости для арктической зоны Сибири (64–74° с. ш. 60–150° в. д.). На территории исследования на градиенте долготы (60–150° в. д.) с интервалом 20–30° были рассмотрены четыре сектора. Границы по долготе для каждого сектора фактически совпадают с границами бассейнов крупных рек Сибири – Оби (сектор I), Енисея (с Хатангой) (сектор II), Лены (сектор III), Яны/Индикирки/Колымы (сектор IV) (рис. 1).

Сектор I (64–70° с. ш., 60–80° в. д.) имеет площадь ~507 тыс. км², расположен на севере Западной Сибири. В данном субрегионе климат формируется под влиянием циклонической деятельности в течение всего года. Зима относительно теплая, температуры января варьируют с запада на восток от –6 до –28 °С. Летом возможен заток арктических воздушных масс, которые задерживают сход снега весной и, соответственно, лимитируют длительность пожароопасного сезона. Температура воздуха в июле может варьировать с севера на юг от 4 до 13 °С. Годовое количество осадков составляет 500–600 мм (Национальный атлас..., 2021a). На торфяных и оглеенных тундровых почвах пре-

обладает в основном тундровая растительность (кустарничково-моховые северные и ерниковые мохово-лишайниковые южные тундры), встречаются сосновые из сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственничные из лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) редколесья. Средняя лесистость – от 5 до 20 % (Национальный атлас..., 2021б).

В секторе II (64–74° с. ш., 80–110° в. д.) площадью ~1257 тыс. км² климат субарктический, характеризуется большой континентальностью. Средняя температура января достигает –45 °С, высота снежного покрова – от 40 до 80 см. Средняя температура июля варьирует от 10 до 14 °С. Годовое количество осадков – от 400 до 1000 мм на наветренных склонах возвышенностей (Национальный атлас..., 2021a).

Лесистость в среднем – 30 %, преобладают лиственничные с лиственницей Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.), и лиственницей сибирской, с елью сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) редколесья на криоземах, подбурях и глееземах (Национальный атлас..., 2011).

Сектор III (64–74° с. ш., 110–130° в. д.) площадью 780 тыс. км² имеет субарктический климат. Растительность преимущественно относится к лиственничным северотаежным лесам и редколесьям с примесью ели сибирской, лесистость 20–60 %. Почвы региона – карболитоземы перегнойные, глеезёмы (Национальный атлас..., 2011; Национальный атлас..., 2021 а, б).

В секторе IV (64–74° с. ш., 130–150° в. д.) также субарктический климат. На площади 703 тыс. км² Верхоянского хребта произрастают тундровые редколесья с лиственницей Каяндера (*Larix*

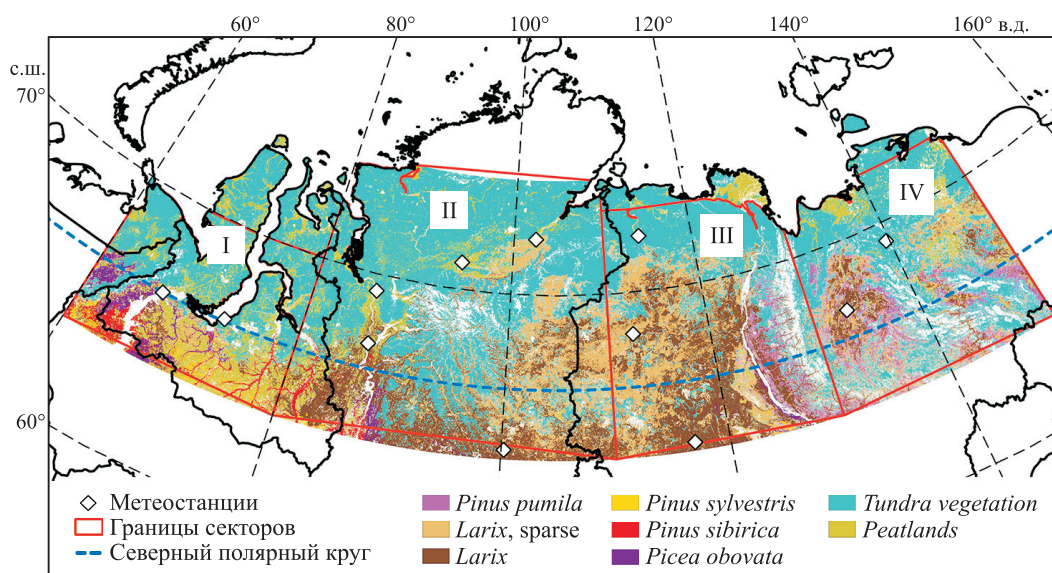


Рис. 1. Район исследований и карта растительности на территорию арктической Сибири (по данным сервиса Vega-Pro, ИКИ РАН 2017, <http://pro-vega.ru/>).

cajanderi Mayr), лесистость – 20–40 %. Почвы па-левые, глееземы, подбуры (Национальный атлас почв..., 2011; Национальный атлас..., 2021 а, б).

Материалы исследований. Многолетние ряды метеорологических показателей были обобщены по данным открытого каталога «Специализированные массивы для климатических исследований» Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации (2023). Всего обработаны материалы по 12 метеостанциям, включая 2 метеостанции в секторе I, 5 в секторе II, 3 в секторе III и 2 в секторе IV. Дополнительно оперировали интерполированными растровыми слоями реанализа данных о температуре воздуха и об осадках с 1901 г. из каталога Global Climate Monitor (2023) с пространственным разрешением $0.5 \times 0.5^\circ$. Для выполнения экстраполяции и корреляционного анализа данные реанализа предпочтительны (Головинов, 2022), так как сеть метеостанций в районе исследований достаточно редка.

Сведения о пожарах получены из архива Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (ИЛ СО РАН) спутникового мониторинга за период 1996–2022 гг. Исходная информация для расчета и анализа горимости территории была получена со спутников серии Terra и Aqua, с использованием многоспектральных данных радиометра MODIS. Использованный режим обработки аналогичен процедурам, реализованных в стандартных каталогах данных NASA (MCD64A1). Важнейшее отличие каталога данных ИЛ СО РАН – это процедура агрегации данных отдельных «пожарных» пикселей в полигоны пожаров на основе порогового пространственно-временного анализа (Пономарёв, Швецов, 2015).

Методы исследования. Используя многолетние ряды данных, мы анализировали вариации гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК), в сравнении с оптимальным уровнем тепло- и влагообеспеченности территорий (Пономарев и др., 2018; Ponomarev et al., 2018). Обработывались данные для летнего периода (июнь–август), когда в районе исследований наиболее вероятны пожары растительности, на основе соотношения

$$\text{ГТК} = \left(\frac{\sum_i r_i}{\sum_i t_i} \right) \times 0.1,$$

где $\sum_i r_i$ – сумма осадков (мм) за каждый i -й день с температурами выше 10°C , $\sum_i t_i$ – сумма температур воздуха ($^\circ\text{C}$) за тот же период, 0.1 – эмпирический нормировочный коэффициент.

Для каждого из рассмотренных показателей выполнялось усреднение по десятилетиям, что

позволило сгладить высокочастотную составляющую вариации рассматриваемых характеристик. Для всех рядов данных были построены линейные регрессии, в первом приближении отражающие тренды изменения в течение рассмотренного временного периода. Коэффициенты наклона (Slope) трендов далее интерпретировались как скорость изменения параметра за 10 лет. Обработка данных, составление таблиц и графиков проводились в программе MS Excel с использованием стандартных методов статистической обработки и построения прогностических трендов.

Процедура геопространственной интерполяции выполнялась с использованием метода обратных взвешенных расстояний (Inverse Distance Weighting, IDW) реализованной в базовом комплекте ГИС с открытым исходным кодом Quantum GIS (2023).

Для каждого сектора на временном интервале 1996–2022 гг. анализировали фактическую горимость по шкале Г. А. Мокеева (1965), как

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

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

На заключительном этапе проведен корреляционный анализ совокупности метеопараметров, влияющих на возникновение пожаров и на характеристики горимости в регионе. Предварительно проверялось выполнение условий, определяющих достоверность корреляционных связей, а именно нормальность распределения каждого параметра, линейность и независимость переменных (Hawkins, 2014). Анализ позволил характеризовать уровень связей и определить значимость метеорологических факторов, влияющих на фактический уровень горимости арктической зоны Сибири. Дополнительно выполнены пространственно-временные экстраполяции основных параметров стандартными средствами ГИС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пожары арктической зоны Сибири. Анализ многолетних материалов инструментальной регистрации пожаров на территории $> 64^\circ$ с. ш. позволяет констатировать, что в 1996–2022 гг. их среднемноголетнее количество составля-

ло $\sim 4.56 \pm 1.15$ % общей статистики Сибири, а ежегодные площади варьировали на уровне $\sim 11.16 \pm 4.56$ % пройденной пожарами за сезон (рис. 2). Экстремальные пожарные события северных территорий повторяются с периодом $T = 5 \pm 2$ лет, для таких сезонов характерен значительный (в 2–4 раза) рост площадей пожаров относительно среднемноголетних норм. В хронологическом порядке к таким сезонам можно отнести 2001, 2005, 2013, 2018–2020 гг. В пожароопасные сезоны этих лет площадь пожаров на территории $> 64^\circ$ с. ш. превышала пороговое значение среднемноголетнего показателя на одно и более стандартных отклонений ($S > S_{\text{ср}} + SD$). Следует обратить внимание на то, что в течение нескольких последних лет (2018–2021 гг.) среднемноголетний уровень горимости был превышен в течение нескольких сезонов подряд, что является качественно новой особенностью пожарных режимов Севера Сибири (рис. 2).

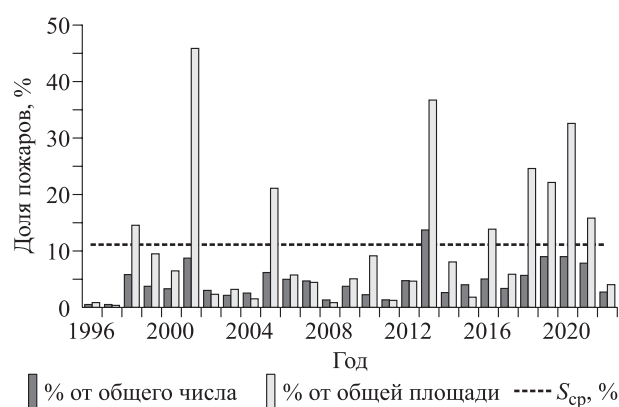


Рис. 2. Доля пожаров в зоне Арктики ($> 64^\circ$ с. ш.) от общей статистики для Сибири в 1996–2022 гг.

Метеорологические условия. С начала XXI в. в арктической зоне Сибири фиксируется положительный тренд для данных о температуре воздуха (ТВ), продолжительности вегетационного периода (ВП) и числа дней с грозовой активностью (рис. 3).

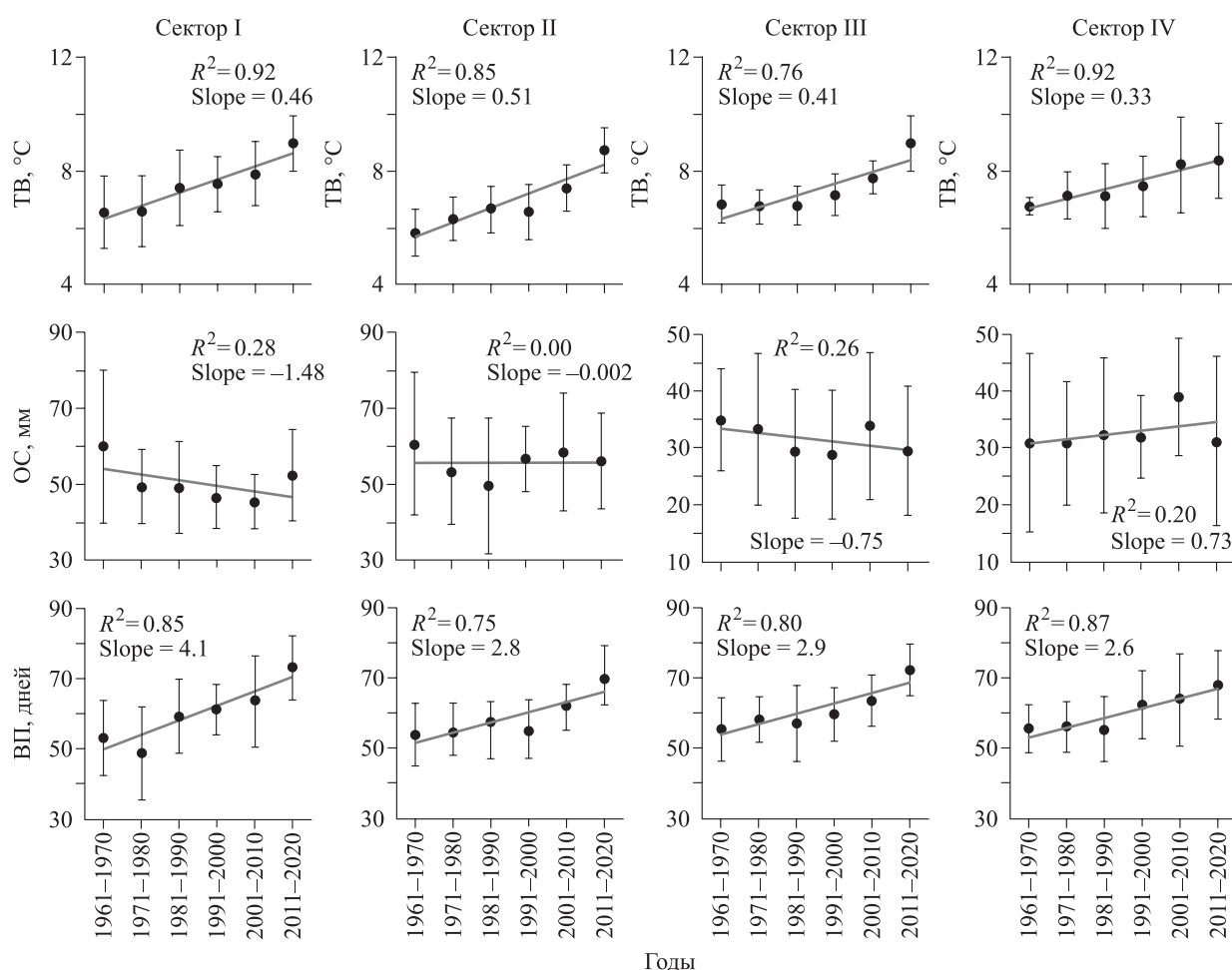


Рис. 3. Тренды климатических факторов в арктической зоне на основе рядов, усредненных по 10-летним периодам.

ТВ – средняя температура воздуха за май–сентябрь; ОС – среднеемесячное количество осадков в период май–сентябрь; ВП – продолжительность вегетационного периода.

Таблица 1. Число дней с грозами на градиенте долготы (по секторам) в сравнении за 1966–1980 и 2011–2020 гг. и уровень корреляции (r) с температурой воздуха летнего периода

Сектор	Среднегодовое число дней с грозой за годы		Относительный прирост, %	Скорость прироста, дней/10 лет	r
	1966–1980	2011–2020			
I	2.2 ± 1.8	7.7 ± 3.7	255.8 ± 62.6	2.01	0.54
II	2.3 ± 1.8	5.2 ± 3.0	123.9 ± 40.2	2.7	0.57
III	2.2 ± 1.8	3.8 ± 2.6	92.1 ± 36.5	1.27	0.53
IV	2.1 ± 1.8	2.9 ± 1.7	31.6 ± 44.7	0.59	0.31

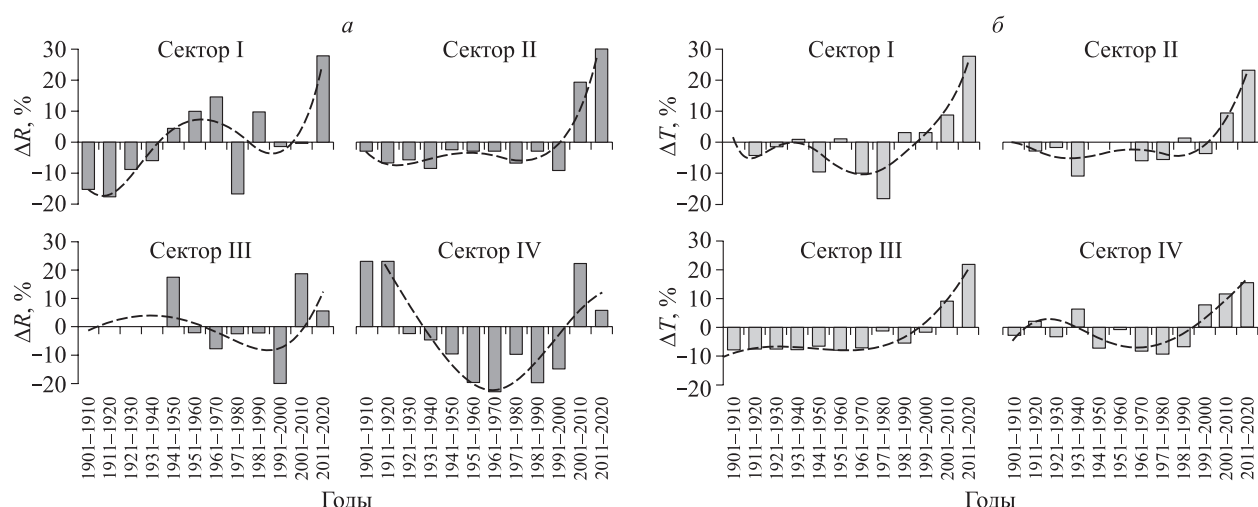
Среднее повышение температуры воздуха за май–сентябрь на градиенте долготы составляло $0.46^\circ\text{C}/10$ лет в секторе I, $0.51^\circ\text{C}/10$ лет в секторе II, $0.41^\circ\text{C}/10$ лет в секторе III и $0.33^\circ\text{C}/10$ лет в секторе IV. Наиболее значимый рост температуры в 2011–2022 гг. по отношению к периоду 1951–1960 гг. наблюдается в Средней и Восточной Сибири (секторы II и III), который в относительных значениях составил 30 и 39 % соответственно. В секторах I и IV относительный рост температуры воздуха варьировал на уровне 20–27 %. Относительное увеличение длительности вегетационного периода за 50 лет составило $\sim 30\%$, достигнув значения 71 ± 14.8 дней в 2011–2020 гг. по сравнению с 54 ± 9 дней в 1961–1970 гг. Для осадков характерен незначительный (0.73 мм/10 лет) тренд роста только в VI секторе, на остальной территории отмечается их снижение (-0.002 , -0.75 и -1.48 мм/10 лет).

Изменение числа дней с грозовыми разрядами при общем росте среднегодовых значений в районе исследований на 31–255 % демонстрирует различия на градиенте долготы (табл. 1).

С запада на восток характеристика возрастает с ~ 2.1 – 2.3 дня/год в 1966–1980 гг. до 2.9 – 7.7 дней/год в 2011–2020 гг. Усредненная за более чем 50-летний период скорость прироста данного фактора варьирует на уровне 0.59 – 2.7 дней/10 лет.

Увеличение числа дней с грозой коррелирует с динамикой температуры воздуха летнего периода (май–сентябрь) на уровне $r = 0.31$ – 0.57 . Такая связь согласуется с оценками темпов увеличения грозовой активности при повышении средних глобальных температур на $\sim 12\%$ / 1°C (Romps et al., 2014). При этом следует обратить внимание на тот факт, что относительный прирост значений данной характеристики в северных территориях Сибири (секторы I–III) значительно выше (92–255 %) в сравнении с данными для центральных (42 %) и южных (35 %) субрегионов (Иванов и др., 2023; Ivanov et al., 2023).

Показательна динамика усредненных по десятилетиям значений осадков и температур вегетационного периода по отношению к среднестатистической норме, рассчитанной за 120-летний период по материалам реанализа (рис. 4).

**Рис. 4.** Амплитуды аномалий, усредненных по 10-летним периодам суммы осадков (а) и суммы температур (б) вегетационного периода по отношению к значению 120-летней нормы.

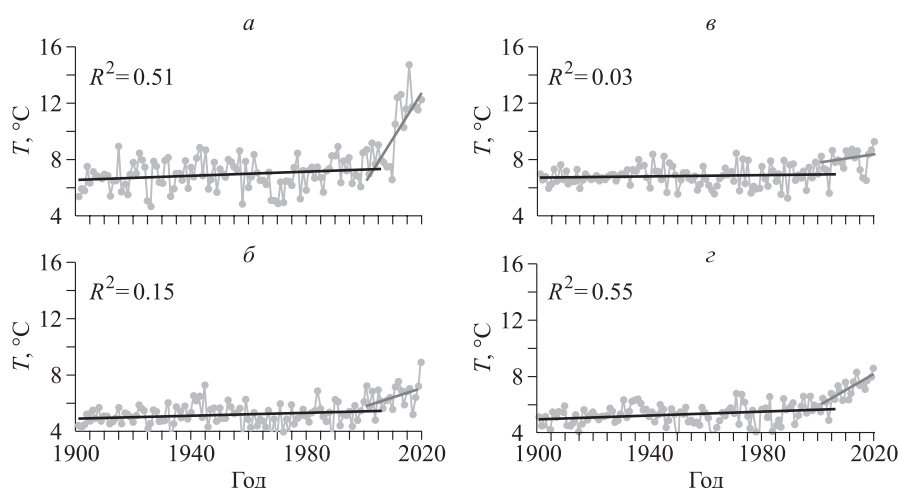


Рис. 5. Температура вегетационного периода по данным реанализа за 1901–2021 гг. в рассматриваемых секторах I (а), II (б), III (в), IV (г).

Линейный тренд для 2010–2021 гг. выделен короткой прямой линией серого цвета с правой стороны рисунков.

Вариация и амплитуды аномалий относительно среднееголетних значений рассмотренных характеристик на качественном и количественном уровне позволяют описать долгопериодическую цикличность с периодом $T \sim 40\text{--}50$ лет. Это укладывается в известные режимы изменчивости климатической системы, один из периодов которых составляет 20–60 лет (Бышев и др., 2014; Byshev et al., 2014), и объясняется общефизическими закономерностями динамики циркуляции атмосферы (Гирс, 1971), сохраняющей стабильность в течение от 1–4 десятилетий (Семенов, 2008; Semenov, 2008; Боков, Воробьев, 2010). При этом существенное изменение скорости роста температуры воздуха в 2010–2021 гг. прослеживается на всей территории исследований (рис. 5).

Начальный рост температуры воздуха вегетационного периода приходится на 2000-е годы, когда в среднем на $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ был превышена норма температуры периода 1900-х годов, что согласуется с прогнозами глобального потепления в Арктике (Descals et al., 2022).

В последнее десятилетие рассмотренного ряда 2011–2020 гг. в секторах I и II средняя амплитуда аномалии суммы осадков (ΔR , %) за вегетационный период была на 27 и 32 % выше нормы 1901–2020 гг. (рис. 4). В то же время в восточных секторах III и IV аномалия осадков – 5.60 и 7.65 % – на уровне дисперсии значений. При этом аномалии температуры (ΔT , %) к настоящему времени имеют значительные положительные амплитуды (15–27 %) на территории каждого из рассмотренных секторов, чего не случалось за 120 лет.

Отмеченные особенности метеорологических режимов, в первую очередь значимые для восточных секторов (III и IV) Арктики, могут косвенно свидетельствовать об усилении засушливости климата и, следовательно, быть предвестником роста горимости и интенсивности пожаров в восточной части арктической зоны Сибири, как это отмечается и в других публикациях по теме (Hayasaka, 2021).

Показатель тепло- и влагообеспеченности территории (ГТК) имеет отрицательный тренд для секторов I, III, в секторах II и IV изменения на временном интервале 1950–2020 гг. в целом незначительны (рис. 6).

При этом сглаженные по десятилетиям значения для секторов I, III и IV отражают снижение абсолютных значений ГТК с 1.32 до 1.28, с 0.72 до 0.63 и с 0.87 до 0.74 соответственно, в секторе II изменение тепло- и влагообеспеченности в настоящее время не имеет ярко выраженной тенденции.

Имеющиеся данные представлены в виде модели пространственно-временной вариации значений температуры воздуха и количества осадков вегетационного периода (рис. 7).

Можно констатировать, что рост температуры воздуха во всех рассмотренных секторах арктической зоны имеет одну и ту же тенденцию с незначительным отличием в восточной части (рис. 7, а). В то же время количество осадков за вегетационный период распределено неравномерно по территории, а в восточных секторах выражен тренд на снижение данного показателя (рис. 7, б).

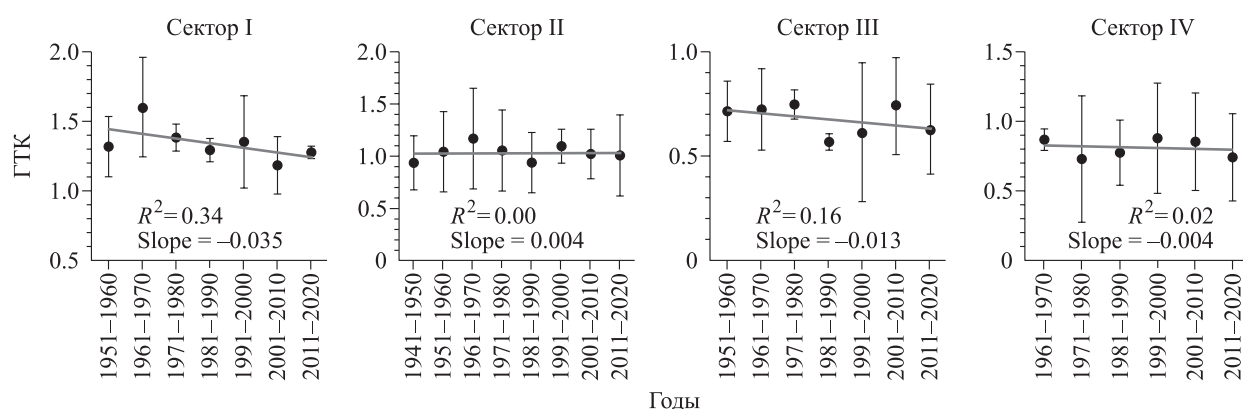


Рис. 6. Усредненные по десятилетиям значения показателя тепло- и влагообеспеченности (ГТК) по данным метеостанций.

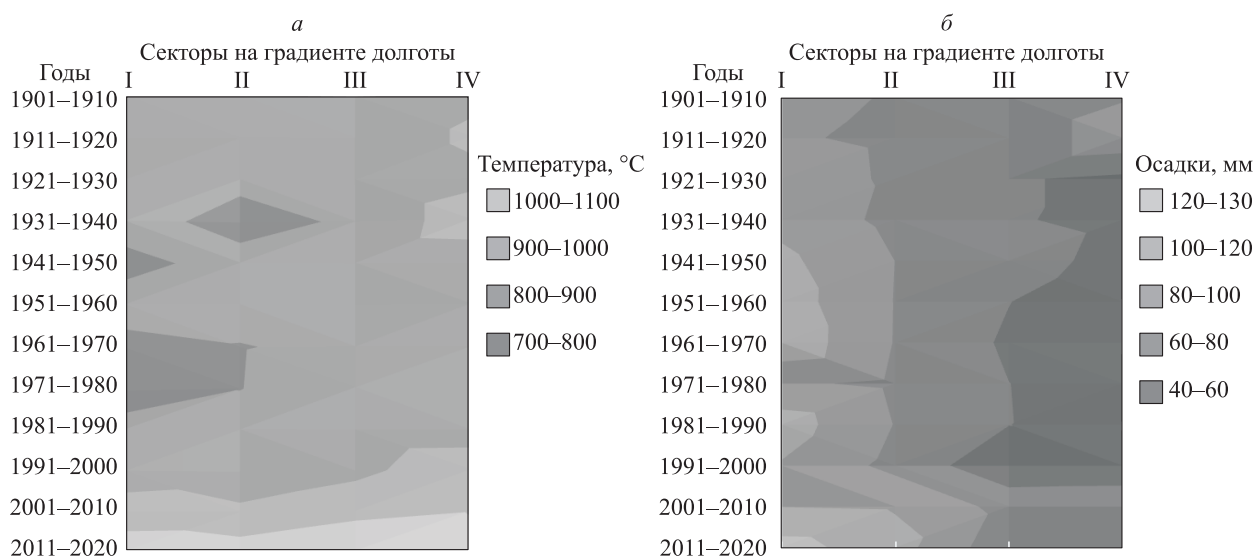


Рис. 7. Распределение сумм температуры воздуха (а) и осадков вегетационного периода (б) в арктических широтах ($64\text{--}74^{\circ}$ с. ш.).

Результаты, определенные для нерегулярной сети метеостанций, интерполированы стандартными средствами геоинформационной системы Quantum GIS (2023). Полученные пространственно-временные экстраполяции иллюстрируют динамику во времени и на градиенте долготы (рис. 8).

Горимость на территории исследований. Количество и площади пожаров в арктической Сибири увеличиваются с начала XXI в., повторяя закономерности пожаров в тундре Аляски и Канады (Mack et al., 2011; French et al., 2015).

Пространственно наблюдается также смещение пожаров на восток, в 2011–2020 гг. наибольшая горимость отмечается для секторов III и IV (рис. 8, д, е).

Как уже отмечалось ранее (см. рис. 2), экстремальными пожароопасными сезонами последнего десятилетия можно считать период

2018–2021 гг. Если ориентироваться на среднеемноголетние значения показателя горимости $\langle y \rangle$, которые равны $\langle y \rangle = 0.29, 0.22, 0.67$ и 0.62% соответственно для секторов I, II, III, IV, то можно говорить о качественно новых режимах пожаров, развивающихся в последнее десятилетие по крайней мере для секторов II, III, IV, где горимость увеличилась в несколько раз до $\langle y \rangle = 0.69, 2.65$ и 4.86% соответственно (рис. 9).

Экстремально высокие показатели горимости вероятно связаны с крупными пожарами, длительность которых может достигать 30 и более дней. В общей многолетней статистике таких длительных пожаров не более 5–7% (рис. 10).

Достоверность корреляционных связей между параметрами горимости в регионе и рассмотренным набором метеорологических характе-

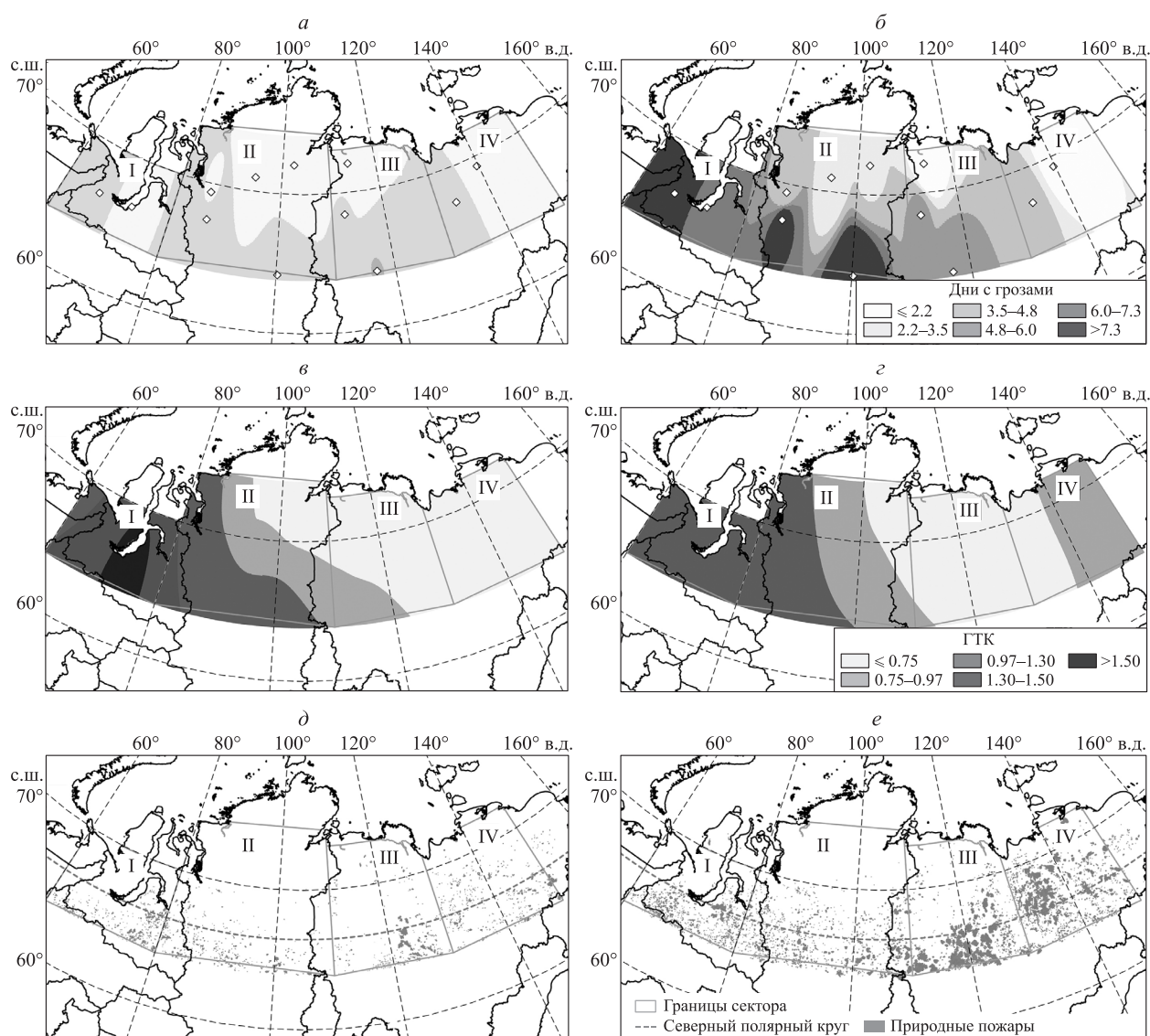


Рис. 8. Пространственно-временная экстраполяция данных метеостанций на район исследований.

а, б – распределения среднегогодовых значений дней с грозой за периоды 1966–1980 и 2011–2020 гг.; в, з – вариация ГТК на временных интервалах 1961–1970 и 2011–2020 гг.; д, е – фактическое распределение пожаров на временных интервалах 2002–2010 и 2011–2020 гг.

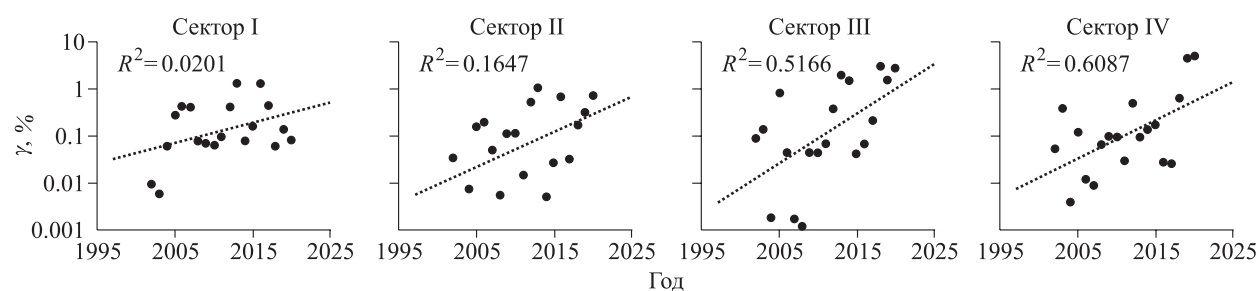


Рис. 9. Горимость на градиенте долготы за период инструментальных спутниковых наблюдений 1996–2022 гг.

ристик обусловлена выполнением совокупности требуемых условий (Hawkins, 2014). Для рассматриваемых параметров характерен квазинормальный вид распределения (рис. 11, а–д), а также линейность связей с показателем горимости (рис. 11, е–к).

В последнем случае в качестве зависимой переменной выбрана частота пожаров (рис. 11, к), поскольку грозовая активность в большей степени определяет статистику числа возгораний, а не площадей пожаров (Иванов и др., 2023; Ivanov et al., 2023).

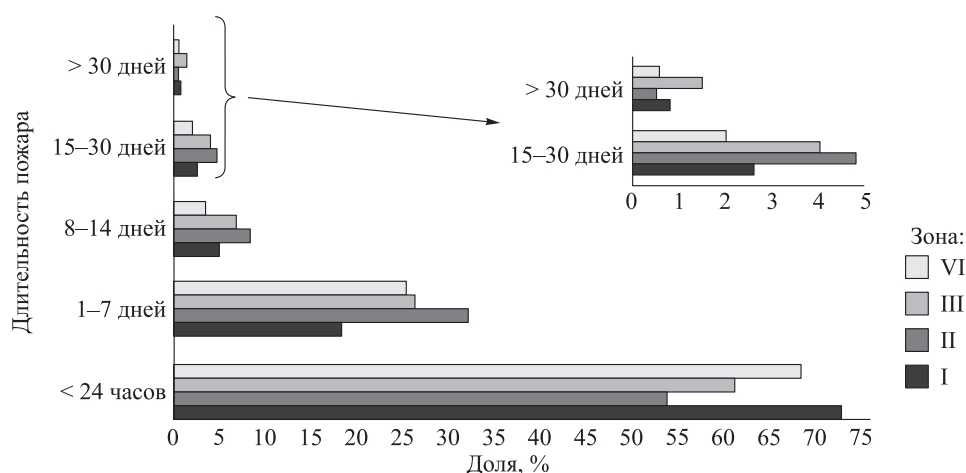


Рис. 10. Распределение длительности пожаров по зонам исследований. Данные инструментального спутникового мониторинга ИЛ СО РАН 1996–2022 гг.

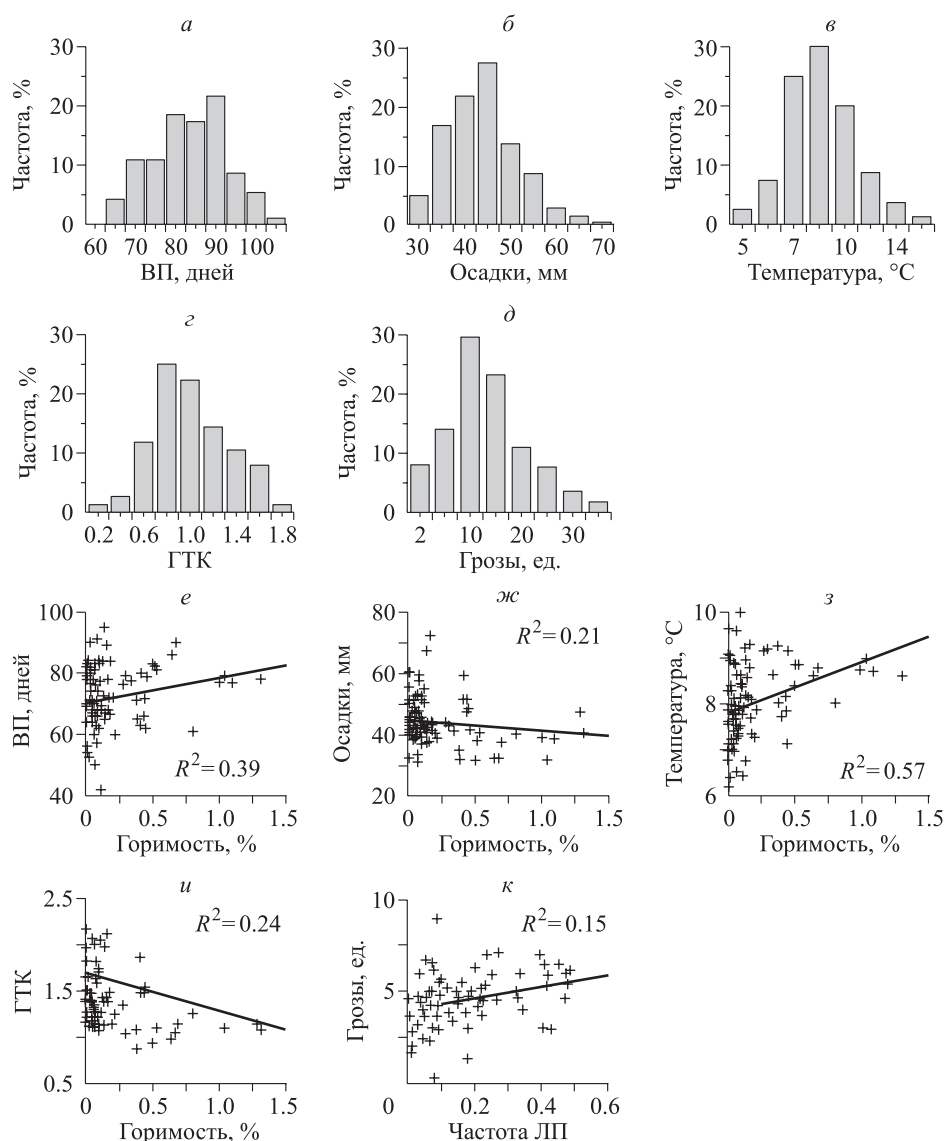


Рис. 11. Результаты предварительного анализа независимых переменных.

a–д – проверка нормальности распределения; *е–к* – линейность связи с показателями горимости/частотой пожаров.

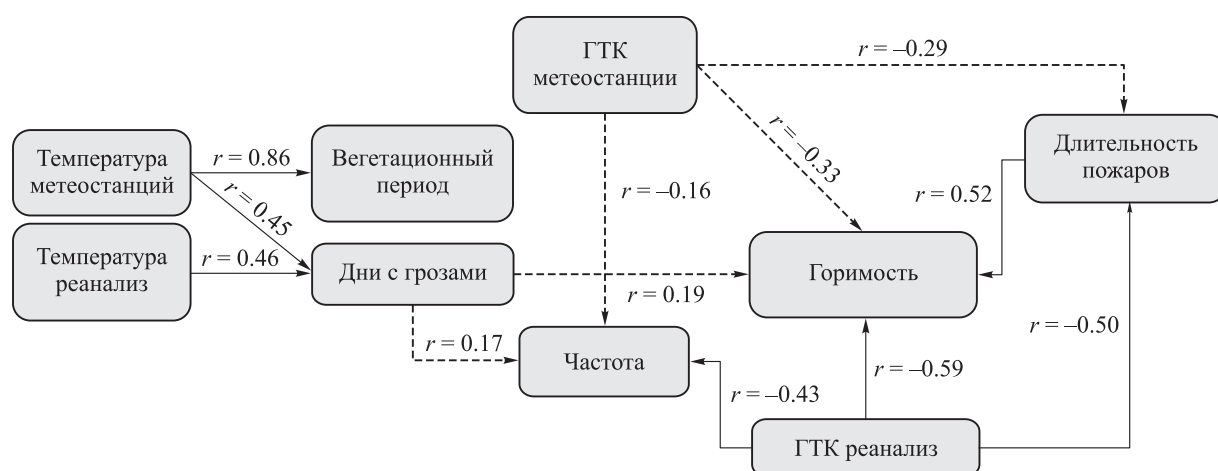


Рис. 12. Взаимосвязи между факторами возникновения пожаров в Сибирской Арктике на 2002–2022 гг.

Рассмотренный набор метеорологических характеристик, по общему признанию многих исследователей (Flannigan et al., 2009; Школьник и др., 2012; Shkol'nik et al., 2012; Валеник и др., 2014; Бышев и др., 2014; Byshev et al., 2014; Шерстюков Б. Г., Шерстюков А. Б., 2014; Sherstyukov B. G., Sherstyukov A. B., 2014; Hayasaka, 2021; Иванов и др., 2023; Ivanov et al., 2023), следует рассматривать в качестве наиболее значимых независимых переменных, определяющих горимость лесов. При этом присутствие в качестве переменных таких параметров, как ГТК, фактически вычисляемого на основе независимых переменных осадков и температуры, или параметра числа гроз, имеющего в матрице кросс-корреляции с осадками значение $r = 0.44$, также следует считать оправданным. В этих случаях необходимо учитывать, что независимые переменные могут определять изменение как показателя горимости, связанного с площадями пожаров, так и показателя числа пожаров, где важно, например, влияние источников огня (молниевых разрядов), а кроме того, – уровня пожарной опасности по условиям погоды. В частности, температура воздуха вегетационного периода коррелирует с продолжительностью вегетационного периода ($r = 0.86$) и грозовой активностью ($r = 0.46$); показатель тепло- и влагообеспеченности (ГТК) имеет значимую обратную связь с горимостью ($r = -0.59$), с длительностью пожаров ($r = -0.5$) и с частотой пожаров ($r = -0.43$).

Корреляционная матрица для совокупности квазинезависимых метеопараметров, влияющих на возникновение пожаров и на характеристики горимости в регионе, позволяет констатировать

значимый уровень корреляции между площадью пожаров и длительностью вегетационного периода ($r = 0.32$), осадками ($r = -0.31$), температурой воздуха летнего периода ($r = 0.60$). При этом число пожаров определяется совокупностью переменных: длительностью вегетационного периода ($r = 0.25$), количеством осадков ($r = -0.38$), температурой воздуха летнего периода ($r = 0.49$) и грозовой активностью ($r = 0.20$). В целом горимость во всех секторах района исследований характеризуется значимой обратной корреляционной связью с показателем тепло- и влагообеспеченности ГТК на уровне $r = -0.48 \dots -0.64$ для $p < 0.05$.

Потенциальные взаимосвязи между факторами, связанными с вариацией статистик пожаров растительности, обобщены на схеме (рис. 12).

Важнейшим параметром, характеризующим динамику всех рассмотренных факторов (см. рис. 3, 5, 6, табл. 1), является коэффициент линейного роста (Slope), которые мы применили для временной экстраполяции. Вычисления были обобщены для двух временных интервалов – до 2050 и 2100 г. (табл. 2).

Полученные экстраполяции по температуре согласуются с известными климатическими сценариями для зоны Арктики (Field et al., 2014; Descals et al., 2022). При этом важно, что отрицательный тренд тепло- и влагообеспеченности и увеличение грозовой активности арктической зоны Сибири на 70–80 % к 2050 и 2100 гг. будет значимым триггером изменения режима горимости района исследований на качественном и количественном уровнях.

Прогнозируемый уровень горимости может составить от 2.8 % к 2050 г. до 6.42 % к 2100 г.,

Таблица 2. Временная экстраполяция метеорологических факторов и показателя горимости в арктической зоне Сибири до 2050 и 2100 гг.

Фактор	Сценарий до 2050 г.		Сценарий до 2100 г.	
	Изменения			
	относительные, %	абсолютные	относительные, %	абсолютные
$T_{\text{возд}}$, °С, метеостанции	34.55 ± 5.37	3.08 ± 0.56	43.88 ± 5.81	5.21 ± 0.93
$T_{\text{возд}}$, °С, реанализ	22.39 ± 7.84	1.62 ± 0.81	27.65 ± 9.14	2.37 ± 1.19
ГТК*	-27.12 ± 22.23	-0.23 ± 0.22	-47.74 ± 44.59	-0.33 ± 0.32
Грозы, дней	74.33 ± 8.05	6.45 ± 3.39	80.54 ± 6.58	9.3 ± 4.84
Горимость, %	537.35 ± 293	2.81 ± 2.44	1226.27 ± 670	6.42 ± 5.58

Примечание. Знак минус в значениях обозначает снижение показателя.

значительно превышая современные среднемесячные значения (см. рис. 9) и спорадические экстремумы, зафиксированные для экстремальных сезонов периода 2018–2021 гг. (см. рис. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В арктической зоне Сибири при современных темпах климатических изменений возможно дальнейшее усиление роли пожаров как фактора, определяющего процессы на уровне как экосистем, так и глобального характера. В частности, пожары в тундре влияют не только на растительность, но и на тепловой баланс почвы и мерзлотных слоев. Одно из возможных проявлений – более значительное сезонное протаивание вечной мерзлоты и высвобождение парниковых газов, которые будут способствовать дальнейшему изменению климата (French et al., 2015; Kirdyanov et al., 2020; Witze, 2020; Пономарева и др., 2022).

И хотя повторяемость экстремальных событий в зоне Арктики укладывается в общую цикличность пожарных сезонов Сибири (Conard, Ponomarev, 2020), вероятно, спорадические экстремумы горимости северных территорий будут иметь все большие масштабы в перспективе.

Потенциальные изменения климата, в частности рост температуры летнего периода, дефицит или перераспределение осадков (как в пространственном плане, так и во времени в течение сезона) способны существенно влиять на частоту возникновения пожаров растительности в Сибири и на арктической части территории Сибири в частности. При этом для Арктики Сибири, относимой к зоне исключительно спутникового мониторинга пожаров, будет возрастать риск увеличения площадей пожаров при условии отсутствия системы контроля, предупреждения и выборочного тушения пожаров.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИЛ СО РАН «Природная и антропогенная динамика таежных лесов Средней Сибири в условиях меняющегося климата» (№ FWES-2021-0008). Материалы спутникового мониторинга получены и обработаны с использованием оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С. А., Стыценко Ф. В. Спутниковая оценка гибели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденной огнем площади // Лесоведение. 2021. № 2. С. 115–122.
- Боков В. Н., Воробьев В. Н. Изменчивость атмосферной циркуляции и изменение климата // Учен. зап. Рос. гос. гидрометеорол. ун-та. 2010. № 13. С. 83–88.
- Бышев В. И., Нейман В. Г., Пономарев В. И., Романов Ю. А., Серых И. В., Цурикова Т. В. Роль глобальной атмосферной циркуляции в формировании климатических аномалий Дальневосточного региона России // ДАН. 2014. Т. 458. № 1 С. 92–96.
- Валендик Э. Н., Иванова Г. А. Пожарные режимы в лесах Сибири и Дальнего Востока // Лесоведение. 2001. № 4. С. 69–73.
- Валендик Э. Н., Кисляхов Е. К., Рыжкова В. А., Пономарев Е. И., Голдаммер Й. Г. Лесные пожары в Средней Сибири при аномальных погодных условиях // Сиб. лесн. журн. 2014. № 3. С. 43–52.
- Вахнина И. Л., Носкова Е. В. Изменения климатических условий Юго-Восточного Забайкалья за период вегетации по метеорологическим и дендрохронологическим данным // Гидрометеорол. иссл. и прогнозы. 2021. Т. 381. № 3. С. 80–98.
- ВЕГА-PRO. Спутниковый сервис анализа вегетации. М.: ИКИ РАН, 2017. <http://pro-vega.ru/>
- Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации. Информация о метеорологических данных. Обнинск, 2023. <http://www.meteo.ru>
- Гирс А. А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 280 с.

- Головинов Е. Э., Васильева Н. А. Сравнение многолетних метеорологических характеристик по данным реанализа и наземных наблюдений на территории Московской области // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12. № 3. С. 92–105.
- Иванов В. А., Пономарев Е. И., Иванова Г. А., Мальканова А. В. Грозы и лесные пожары в современных климатических условиях Средней Сибири // Метеорол. и гидрол. 2023. № 7. С. 102–113.
- Мокеев Г. А. Влияние экономических условий на горимость лесов и охрану их от пожаров // Современные вопросы охраны лесов от пожаров и борьбы с ними. М.: Лесн. пром-сть. 1965. С. 26–37.
- Национальный атлас почв Российской Федерации / гл. ред. чл.-корр. РАН С. А. Шоба. М.: Астрель, 2011. 632 с. <https://soil-db.ru/soilatlas>
- Национальный атлас России. М., 2021 а. Т. 2: Климатическое районирование. <https://nationalatlas.ru/tom2/146-150.html>
- Национальный атлас России. М., 2021. Т. 2: Растительность. <https://nationalatlas.ru/tom2/328-330.html>
- Пономарев Е. И., Швецов Е. Г. Спутниковое детектирование лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // Иссл. Земли из космоса. 2015. № 1. С. 84–91.
- Пономарев Е. И., Скоробогатова А. С., Пономарева Т. В. Горимость лесов Сибири и межсезонные вариации уровня тепло- и влагообеспеченности // Метеорол. и гидрол. 2018. № 7. С. 45–55.
- Пономарева Т. В., Пономарев Е. И., Литвинцев К. Ю., Финников К. А., Якимов Н. Д. Тепловое состояние нарушенных почв в криолитозоне Сибири на основе дистанционных данных и численного моделирования // Вычисл. технол. 2022. Т. 27. № 3. С. 16–35.
- Семенов В. А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике // ДАН. 2008. Т. 418. № 1. С. 106–109.
- Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.
- Шерстюков Б. Г., Шерстюков А. Б. Оценки тенденций усиления лесных пожаров в России до конца XXI в. по данным сценарных экспериментов климатических моделей пятого поколения // Метеорол. и гидрол. 2014. № 5. С. 17–30.
- Школьник И. М., Мелешко В. П., Ефимов С. В., Стафеева Е. Н. Изменения экстремальности климата на территории Сибири к середине XXI в.: ансамблевый прогноз по региональной модели ГГО // Метеорол. и гидрол. 2012. № 2. С. 5–22.
- Цатуров Ю. С., Клепиков А. В. Современное изменение климата Арктики: результаты нового оценочного доклада Арктического совета // Арктика: экология и экономика. 2012. Т. 4. № 8. С. 76–81.
- Arctic Climate Impact Assessment (ACIA). Overview report. Cambridge Univ. Press, 2005. 1020 p.
- Byshev V. I., Neyman V. G., Ponomarev V. I., Romanov Yu. A., Serykh I. V., Tsurikova T. V. The influence of global atmospheric oscillation on formation of climate anomalies in the Russian Far East // Dokl. Earth Sci. 2014. V. 458. Part 1. P. 1116–1120 (Original Rus. text © V. I. Byshev, V. G. Neiman, V. I. Ponomarev, Yu. A. Romanov, I. V. Serykh, T. V. Tsurikova, 2014, publ. in Doklady Akademii Nauk. 2014. V. 458. N. 1. P. 92–96).
- Ciavarella A., Cotterill D., Stott P., Kew S., Philip S., Oldenborgh G. J. van, Skålevåg A., Lorenz P., Robin Y., Otto F., Hauser M., Seneviratne S. I., Lehner F., Zolina O. Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence // Climatic Change. 2021. V. 166. Iss. 1–2. Article 9. 18 p.
- Conard S. G., Ponomarev E. I. Fire in the north – the 2020 Siberian fire season // Wildfire. 2020. N. 4. 7 p.
- Descals A., Gaveau D. L., Verger A., Sheil D., Naito D., Peñuelas J. Unprecedented fire activity above the Arctic Circle linked to rising temperatures // Science. 2022. V. 378. Iss. 6619. P. 532–537.
- Dymov A. A., Startsev V. V., Yakovleva E. V., Dubrovskiy Y. A., Milanovsky E. Y., Severgina D. A., Panov A. V., Prokushkin A. S. Fire-induced alterations of soil properties in albic podzols developed under pine forests (middle taiga, Krasnoyarsky Kray) // Fire. 2023. V. 6. Iss. 2. Article 67. 22 p.
- Field C. B., Barros V., Dokken D. J. Climate Change 2014 – Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Global and Sectoral Aspects In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Chapter: IPCC, 2014: Summary for policy-makers. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge Univ. Press, 2014. P. 1–32.
- Flannigan M., Stocks B., Turetsky M., Wotton M. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest // Glob. Change Biol. 2009. V. 15. Iss. 3. P. 549–560.
- French N. H. F., Jenkins L. K., Loboda T. V., Flannigan M., Jandt R., Bourgeau-Chavez L. L., Whitley M. Fire in the tundra of Alaska: Past fire activity, future fire potential, and significance for land management and ecology // Int. J. Wildland Fire. 2015. V. 24. Iss. 8. P. 1045–1061.
- Global Climate Monitor, 2023. <https://www.globalclimate-monitor.org/#>
- Hayasaka H. Rare and extreme wildland fire in Sakha in 2021 // Atmosphere. 2021. V. 12. Iss. 12. Article 1572. 14 p.
- Hawkins D. Biomeasurement: A student's guide to biological statistics. 3rd ed. Oxford, UK: Oxford Univ. Press, 2014. 333 p.
- Ivanov V. A., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Malkanova A. V. Thunderstorms and forest fires in current climatic conditions of Central Siberia // Rus. Meteorol. and Hydrol. 2023. N. 7. P. 630–638 (Original Russian text © V. A. Ivanov, E. I. Ponomarev, G. A. Ivanova, A. V. Malkanova, 2023, publ. in Meteorol. i gidrol. 2023. N. 7. P. 102–113).
- Ivanova G. A. The history of forest fire in Russia // Dendrochronologia. 1998. V. 16–17. P. 147–161.
- Kharuk V. I., Dvinskaya M. L., Im S. T., Golyukov A. S., Smith K. T. Wildfires in the Siberian Arctic // Fire. 2022. V. 5. N. 4. Article 106. 15 p.
- Kirdyanov A. V., Saurer M., Siegwolf R., Knorre A. A., Prokushkin A. S., Churakova, O. V., Fonti M. V., Büntgen U. Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia // Environ. Res. Lett. 2020. V. 15. N. 3. Article 034061. 11 p.
- Knorre A. A., Kirdyanov A. V., Prokushkin A. S., Krusic P. J., Büntgen U. Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer

- dynamics in Central Siberia // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 652. Iss. 3. P. 314–319.
- Mack M. C., Bret-Harte M. S., Hollingsworth T. N., Jandt R. R., Schuur E. A. G., Shaver G. R., Verbyla D. L. Carbon loss from an unprecedented Arctic tundra // *Nature*. 2011. V. 475. N. 7357. P. 489–492.
- Ponomarev E. I., Masyagina O. V., Litvintsev K. Y., Ponomareva T. V., Shvetsov E. G., Fennikov K. A. The effect of post-fire disturbances on a seasonally thawed layer in the permafrost larch forests of Central Siberia // *Forests*. 2020. V. 11. Iss. 8. Article 790. 18 p.
- Ponomarev E. I., Skorobogatova A. S., Ponomareva T. V. Wildfire occurrence in Siberia and seasonal variations in heat and moisture supply // *Rus. Meteorol. Hydrol.* 2018. V. 43. Iss. 7. P. 456–463 (Original Russian text © E. I. Ponomarev, A. S. Skorobogatova, T. V. Ponomareva, 2018, publ. in *Meteorol. i gidrol.* 2018. N. 7. P. 45–55).
- Ponomarev E. I., Zabrodin A. N., Shvetsov E. G., Ponomareva T. V. Wildfire intensity and fire emissions in Siberia // *Fire*. 2023. V. 6. Iss. 7. Article 246. 14 p.
- Quantum Geographic Information System. Ver. 3.22.14, 2023. <https://www.qgis.org/ru/site/forusers/download.html>
- Romps D., Seeley J., Vollaro D., Molinari J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming // *Science*. 2014. V. 346. N. 6211. P. 851–854.
- Semenov V. A. Influence of oceanic inflow to the Barents Sea on climate variability in the Arctic region // *Dokl. Earth Sci.* 2008. V. 418. Iss. 1. P. 91–94 (Original Rus. text © V. A. Semenov, 2008, publ. in *Dokl. Akademii Nauk.* 2008. V. 418. N. 1. P. 106–109).
- Sherstyukov B. G., Sherstyukov A. B. Assessment of increase in forest fire risk in Russia till the late 21st century based on scenario experiments with fifth-generation climate models // *Rus. Meteorol. Hydrol.* 2014. V. 39. Iss. 5. P. 292–301 (Original Rus. text © B. G. Sherstyukov, A. B. Sherstyukov, 2014, publ. in *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2014. N. 5. P. 17–30).
- Shkol'nik I. M., Meleshko V. P., Efimov S. V., Stafeeva E. N. Changes in climate extremes on the territory of Siberia by the middle of the 21st century: An ensemble forecast based on the MGO regional climate model // *Rus. Meteorol. Hydrol.* 2012. V. 37. Iss. 2. P. 71–84 (Original Rus. text © I. M. Shkol'nik, V. P. Meleshko, S. V. Efimov, E. N. Stafeeva, 2012, publ. in *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2012. N. 2. P. 5–23).
- Shvidenko A. Z., Shchepashchenko D. G. Climate changes and wildfires in Russia // *Contemp. Probl. Ecol.* 2013. V. 6. N. 7. P. 683–692 (Original Rus. text © A. Z. Shvidenko, D. G. Shchepashchenko, 2013, publ. in *Lesovedenie*. 2013. N. 5. P. 50–61).
- Witze A. The Arctic is burning like never before – and that's bad news for climate change // *Nature*. 2020. V. 585. N. 7825. P. 336–337.
- Xu W., Scholten R. C., Hessilt T. D., Liu Y., Veraverbeke S. Overwintering fires rising in eastern Siberia // *Environ. Res. Lett.* 2022. V. 17. N. 4. Article 45005. 10 p.

WILDFIRES OF THE ARCTIC ZONE OF SIBERIA UNDER THE CONDITIONS OF CLIMATIC CHANGES OF THE XX – EARLY XXI CENTURIES

P. D. Tretyakov^{1, 2}, E. I. Ponomarev^{1, 2}

¹ V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch,
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation

² Siberian Federal University
Prospekt Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation

E-mail: ptretyakov99@mail.ru, evg@ksc.krasn.ru

The dynamics of vegetation fires on the territory of the Arctic zone of Siberia (64–74°N, 60–150°E) was studied under the conditions of observed climatic changes at the turn of the XX – beginning of the XXI centuries. In the study area, four sectors with an interval of 20° were considered on the longitude gradient, so that the longitude boundaries for each sector coincided with the boundaries of the basins of the large rivers Ob, Yenisei (with Khatanga), Lena, Yana, Indigirka, and Kolyma. As the initial data, the V. N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences fire bank was used, collected from satellite monitoring materials in 1996–2022, as well as materials of reanalysis of meteorological information on the territory of Siberia from open catalogs for more than 100-year observation interval 1900–2022. The paper analyzes the spatio-temporal variation of the main meteorological characteristics, including air temperature, precipitation, lightning activity with details on the longitude gradient. Additionally, the trends of changes in the level of heat and moisture supply and the duration of the fire-hazardous period have been restored. The measure of the relative anomalies of the main meteorological factors in the time interval 2000–2022 in comparison with the average statistical norms of the 100-year period and the relative rate of their change in the modern climate are revealed. Geospatial interpolation was performed by means of geoinformation systems. Qualitatively and quantitatively, the level of connection between the burning of the Siberian Arctic in the period 2002–2022 has been established, depending on the off-season variations of heat and moisture availability.

Keywords: *vegetation fires, satellite data, meteorological information, spatial interpolation, hydrothermal coefficient, trends.*

How to cite: 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 // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2023. N. 6. P. 17–31 (in Russian with English abstract and references).