

Научная статья

УДК 502.313

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.82>

EDN: CXOYBY

Изменения повторяемости сухих гроз при современном потеплении климата на примере некоторых районов Якутии и Красноярского края

А. В. Холопцев

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, 662972, Железногорск, ул. Северная, 1
knd@sibpsa.ru

Аннотация. *Введение.* Отличительной особенностью сухих гроз является отсутствие при этих явлениях атмосферных осадков, что способствует развитию лесных пожаров, возникающих в результате ударов молний, поджигающих горючий материал. На лесопокрытых, но ненаселённых территориях такие грозы являются основной причиной образования пожаров. Принято считать, что при усилении засушливости местного климата их повторяемость повышается. Тем не менее, особенности её изменений в период современного потепления климата над теми или иными регионами России, обладающими значительными лесными ресурсами, изучены недостаточно. Поэтому их выявление для регионов, расположенных в Сибири, является актуальной проблемой экологии и безопасности при чрезвычайных ситуациях. *Целью* работы являлось выявление тенденции межгодовых изменений повторяемости сухих гроз в различные летние месяцы и в целом за грозоопасные сезоны 1961–2023 гг. для Якутии и Красноярского края. *Объект и методы исследования.* Объектом исследования являлись изменения повторяемости сухих гроз и среднемесячных температур воздуха в приземном слое атмосферы, оценённых для месяцев грозоопасных сезонов, которые произошли за период с 1961 по 2023 гг. Исследование осуществлено с применением метода корреляционного анализа и критерия Стьюдента. *Результаты.* Установлено, что тенденции межгодовых изменений повторяемости сухих гроз определяются не только вариациями местного климата, но и географическим положением изучаемых территорий. Для пунктов, расположенных на Приленском плато, в бассейнах рек Лена и Яна, для любых летних месяцев климатические нормы повторяемости сухих гроз за рассматриваемый период увеличились значительно быстрее, чем повторяемости всех гроз. Для пунктов Оймяконского нагорья и Среднесибирского плоскогорья этой особенности не выявлено. *Выводы.* Показано, что синхронная корреляция вариаций повторяемости сухих гроз и термического режима территории значимой является не повсеместно, что указывает на наличие существенного влияния на неё иных, предположительно ландшафтных факторов.

Ключевые слова: сухая гроза; лесной пожар; повторяемость; чрезвычайная ситуация; Республика Саха (Якутия); Красноярский край; тенденция; синхронная связь

Финансирование: автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Для цитирования: Холопцев А. В. Изменения повторяемости сухих гроз при современном потеплении климата на примере некоторых районов Якутии и Красноярского края // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 2 (62). С. 82–97. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.82>; EDN: CXOYBY

Введение

Важной разновидностью гроз, характерной для многих регионов Северного умеренного климатического пояса, являются сухие, при которых атмосферных осадков на соответствующих территориях практически не наблюдается [1, 2]. При таких грозях тушение атмосферными осадками возгораний горючего материала, которые возникают при попадании в него молний, не происхо-

дит [3]. В таких случаях инициированные грозами лесные пожары могут развиваться до масштабов, представляющих значительную опасность для населения и экономики [4], поэтому выявление современных тенденций изменений повторяемости сухих гроз (далее ПГС) над теми или иными лесопокрытыми территориями – актуальная проблема метеорологии, климатологии и безопасности при чрезвычайных ситуациях.

© Холопцев А. В., 2024

Наибольший интерес решение рассматриваемой проблемы представляет для регионов, обладающих значительными лесными ресурсами, существенная часть которых расположена на территориях, относящихся к зонам контроля [8] (рис. 1).

В России важнейшими среди таких регионов являются Республика Саха (Якутия) (далее Якутия) и Красноярский край, где суммарные площади упомянутых территорий максимальны [5–7]. Расположение таких территорий, а также районов с другими режимами противопожарных мероприятий, согласно [8], показаны на рис. 1.

Как следует из рис. 1, в Якутии и Красноярском крае к зонам контроля относятся преобладающие части их территорий.

На территории Якутии зона контроля разделена на две части – северную и южную. Её северная часть образована Центрально-Якутской низменностью. Южная часть рассматриваемой зоны представлена Алданским нагорьем. В Красноярском крае зона контроля занимает всю северо-восточную часть его территории, принадлежащую в основном Эвенийскому району, на которой находится

Среднесибирское плоскогорье. Поэтому объектом исследования в данной работе выбрана грозозная активность на территории Красноярского края и Республики Саха Якутия.

Упомянутая территория ограничена рекой Енисей на западе, побережьями морей Карского, Лаптевых и Восточносибирского на севере, горными хребтами, разделяющими водосборные бассейны Тихого и Северного Ледовитого океана на востоке, а также Восточным Саяном, Патомским, Алданским нагорьями на юге. Её часть, расположенную между реками Енисей и Лена, занимает физико-географическая страна Средняя Сибирь, образованная Среднесибирским плоскогорьем, Северо-Сибирской и Центрально-Якутской низменностью, горами Бырранга, плато Путоран, Анабарским и Приленским, а также Алданским нагорьем. Часть территории Якутии, расположенная к востоку от реки Лена, является в основном гористой. Здесь расположены горные хребты Верхоянский, Черского и Момский, а также Эльгинское плоскогорье, к которым с севера прилегают Яно-Индигирская и Колымская низменности.

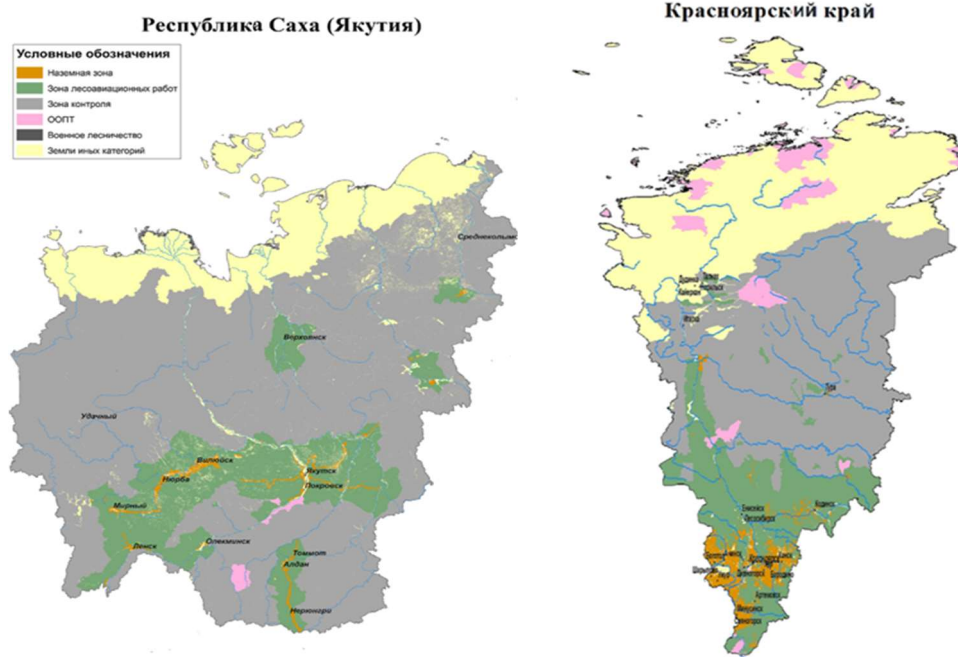


Рис. 1. Расположение участков территории Якутии и Красноярского края с тем или иным режимом противопожарных мероприятий, согласно [8]

Fig. 1. Location of the areas with particular fire prevention regimes on the territory of Yakutia and Krasnoyarsk Krai according to [8]

Изучаемая территория относится к ландшафтной зоне бореальной тайги [9] и характеризуется лесистостью не менее 50 %. Грозы здесь возникают в период с мая по сентябрь [10–12].

По оценкам [13], лишь около 2 % лесных пожаров, которые возникали на территориях Якутии и Красноярского края в 2005–2022 гг., были вызваны грозами.

Следует отметить, что наблюдения, на которых основаны такие оценки, осуществлялись лишь на населённых территориях, где главной причиной лесных пожаров является человеческая деятельность. К тому же учитывались все грозы, возникавшие над рассматриваемыми территориями, а не только сухие грозы, поэтому упомянутые оценки значимости влияния изменений ПГС на горимость лесов Якутии и Красноярского края целесообразно рассматривать как оценки снизу.

Выявлению закономерностей образования над изучаемой территорией гроз посвящены работы многих отечественных авторов [2, 11, 12, 14–22]. Ими установлено, что над её территорией грозы образуются при конвективных процессах в кучево-дождевых облаках Сб. Такие процессы при потеплении климата и прочих равных условиях активизируются [14, 23–25].

Менее изучены условия, при которых образующиеся грозы являются сухими. Такие грозы возникают, если воздух под соответствующими облаками Сб является настолько сухим и тёплым, что выпадающие из них капли дождя успевают полностью испариться, не долетев до земной поверхности [1, 2, 17, 26, 27].

Очевидно, что при прочих равных условиях потепление и усиление засушливости местного климата приводит к увеличению ПГС над рассматриваемой местностью. Вместе с тем, установлено, что за период современного потепления глобального климата средняя интенсивность атмосферных осадков на изучаемой территории увеличилась [28–30].

Относительная влажность воздуха под грозовыми облаками зависит не только от его температуры, но и от интенсив-

ности транспирации в фитоценозах, развивающихся на соответствующей местности. Последняя существенно зависит от состояния этих фитоценозов и пропорциональна суммарной площади зелёного листа, которая за период вегетации изменяется. Зависит она также от увлажнённости почвенных слоёв, питающих влагой корневые системы растений, которая в бореальной тайге развивается на вечной мерзлоте и потому за летний сезон может изменяться, поэтому изменения ПГС над территориями рассматриваемых регионов России могут значимо зависеть от факторов не только климатических, но и ландшафтных.

Следовательно, нами выдвинута гипотеза о том, что над некоторыми участками территорий изучаемых регионов России за период современного потепления глобального климата ПГС повысилась, межгодовые изменения этого показателя над местностями с разными типами ландшафтов различались, а их корреляция с синхронными вариациями средних температур воздуха была значимой не повсеместно.

В некоторых населённых пунктах Якутии и Красноярского края в период современного потепления глобального климата [28] мониторинг грозовой активности производился систематически [31], что позволяет оценить справедливость для них выдвинутого предположения. Тем не менее, ранее тенденции изменений ПГС над такими пунктами изучены не были. Не выявлены также условия, при которых межгодовые изменения среднемесячных температур воздуха (далее СМТ), соответствующие месяцам пожароопасного сезона, в упомянутый период были значимо связаны с вариациями ПГС над какими-либо пунктами.

Всё это не позволяет учесть результаты мониторинга грозовой активности над указанными регионами России при прогнозировании рисков возникновения на их территориях лесных пожаров, а также планировании основных мероприятий соответствующих противопожарных

подразделений. Следовательно, проверка выдвинутой гипотезы и выявление участков территории Якутии и Красноярского края, для которых она справедлива, представляет не только теоретический, но и немалый практический интерес, поэтому предметом исследования в данной работе являются изменения повторяемости сухих гроз при современном потеплении глобального климата на территории Красноярского края и Якутии.

Целью данной работы является выявление районов Якутии и Красноярского края, для которых выдвинутая гипотеза справедлива.

Для её достижения решены следующие **задачи**:

1) выявление особенностей межгодовых изменений ПГС над пунктами территорий Якутии и Красноярского края, которые расположены на местностях с различными типами ландшафтов, как для грозоопасного сезона в целом, так и для различных его месяцев;

2) определение для этих пунктов изменений климатических норм рассматри-

ваемых показателей для современного климатического периода (1991–2020 гг.) по отношению к базовому (1961–1990 гг.);

3) оценка значимости синхронной корреляции межгодовых изменений ПГС для того или иного месяца и пункта, с соответствующими вариациями СМТ.

Материалы и методы

При решении рассматриваемых задач как источник фактического материала о ПГС и СМТ использована информация [31], которая основана непосредственно на результатах наблюдений, проводимых соответствующими гидрометеорологическими станциями Росгидромета.

При выборе репрезентативных пунктов учитывались карты ландшафтов России [32], а также расположения гидрометеорологических станций, на которых в период 1961–2023 гг. проводился систематический мониторинг изменений температур воздуха и грозовой активности [32]. Сведения о физико-географических районах Якутии и Красноярского края, для которых выбранные пункты являлись репрезентативными, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Пункты Якутии и Красноярского края, а также физико-географические районы, для которых они являются репрезентативными

Table 1. Locations in Yakutia and Krasnoyarsk Krai and the physiographic regions they are representative of

Пункт	Широта (°)	Долгота (°)	Абс. высота (м)	Район, для которого пункт репрезентативен
Алдан	58,61	125,36	650	Алданское нагорье, бассейн реки Алдан
Ванавара	60,33	102,26	259	Среднесибирское плоскогорье, бассейн реки Подкаменной Тунгуски
Верхоянск	67,55	133,38	127	Яно-Индиговская низменность, бассейн реки Яны
Вилуйск	63,76	121,61	110	Южная часть Центрально-Якутской низменности, бассейн реки Вилуй
Ленск	60,71	114,88	242	Приленское плато
Оймякон	63,25	143,15	741	Оймяконское нагорье
Сангар	63,96	127,46	80	Долина реки Лены в среднем течении
Туруханск	65,78	87,95	35	Долина реки Енисей в нижнем течении, западные предгорья Среднесибирского плоскогорья
Якутск	62,01	129,75	95	Долина реки Лены в среднем течении (в том числе долина Туймаада)

Как видно из табл. 1, пункты Ванавара и Туруханск относятся к Красноярскому краю и окружены его территориями, которые преимущественно относятся к зоне контроля (см. рис. 1). Прочие пункты, упомянутые в этой таблице, относятся к Якутии, а физико-географические районы, к которым они относятся, занимают существенную и наиболее населённую часть территории этого региона России. Следует отметить, что выбранные пункты репрезентативны лишь для соответствующих районов, указанных в табл. 1. Репрезентативны для таких районов и пункты Туруханск и Алдан, несмотря на то, что они расположены вблизи границ соответствующих физико-географических стран.

При выборе пунктов, репрезентативных для того или иного района, отдано предпочтение тем, где временной ряд наблюдений за грозами охватывал период 1961–2023 гг.

Из табл. 1 следует, что районы, которым соответствуют выбранные пункты, в совокупности перекрывают значительную часть территории Республики Саха (Якутия) и Красноярского края, поэтому результаты исследований, которые могут быть получены для таких пунктов, возможно рассматривать как представительные для всей изучаемой территории.

При разработке методики исследования учитывалось, что значение повторяемости события принято определять, как отношение количества суток, принадлежащих к изучаемому отрезку времени, в течение которых оно имело место, к его общей продолжительности этого отрезка [33]. Поэтому для всех пунктов, упомянутых в табл. 1, каждого грозоопасного сезона и всех его месяцев, по указанному фактическому материалу определены значения ПГС, а также повторяемости всей совокупности гроз (далее ПГ). Также для них вычислены значения СМТ.

Из этих показателей сформированы временные ряды ПГС, ПГ и СМТ.

При решении первой задачи сопоставлялись построенные по этим рядам зависимости ПГС и ПГ от времени, которые соответствуют различным изучаемым пунктам.

При решении второй задачи для каждого пункта грозоопасного сезона в целом и каждого его месяца оценивались тенденции изменений ПГС и ПГ за современный период 2012–2023 гг., а также климатических норм этих показателей за период современного потепления климата (1961–2020 гг.).

Тенденция изменений ПГС или ПГ признавалась значимой, если достоверность такого вывода составляла не менее 0,95.

Принято допущение о том, что отклонения членов ряда от соответствующего тренда подчиняются нормальному закону, поэтому решение о значимости выявленной тенденции выносилось, если выполнялось условие:

$$39A > 1,65\text{СКО},$$

где A – угловой коэффициент линейного тренда рассматриваемого временного ряда; СКО – среднеквадратическое отклонение членов этого ряда от соответствующего тренда.

При выявлении тенденций изменения климатических норм ПГС или ПГ значения этих показателей вычислялись для современного и базового климатического периода, а также определялось значение их разностей.

При решении третьей задачи, как характеристика силы связи между временными рядами ПГС, ПГ, а также СМТ, рассматривалось значение коэффициента их корреляции, поэтому при решении первой задачи применён метод корреляционного анализа.

Изучались связи между временными рядами ПГС, ПГ, а также рядами СМТ для каждого населённого пункта, упомянутого в табл. 1.

Предполагалось, что изучаемые временные ряды соответствуют периоду длиной 62 года. При оценке значимости синхронных связей между соответствующими рядами применялся критерий Стьюдента.

При определении порогового уровня коэффициента корреляции учитывалось наименьшее количество степеней свободы сопоставляемых временных рядов. Упомянутое количество определялось для

каждого ряда по его автокорреляционной функции. Его значение для всей совокупности изучаемых рядов составило 62.

Перед вычислением значения коэффициента корреляции рассматриваемых временных рядов в каждом из них скомпенсирован линейный тренд, коэффициенты которого определены по методу наименьших квадратов.

Решение о значимости корреляции сопоставляемых рядов принималось, если достоверность этого статистического вывода превосходила 0,95 (значение модуля соответствующего порога корреляции составляет 0,25).

Как следует из рассмотренной методики, количество репрезентативных пунктов на территориях Якутии и Красноярского края невелико. К тому же проверку допущения о том, что отклонения членов каждого изучаемого ряда от соответствующего тренда подчиняются нормальному закону, не позволяет осуществить небольшая его длина, поэтому выводы, которые могут быть получены с её применением, следует рассматривать как носящие лишь качественный характер.

Результаты исследования и их анализ

В соответствии с изложенной методикой исследования, при решении первой задачи для каждого рассматриваемого пункта территорий Якутии и Красноярского края, каждого грозоопасного сезона 1961–2023 гг., а также каждого относящегося к нему месяца вычислены значения ПГС и ПГ. Из полученных результатов сформированы временные ряды, отражающие зависимости количества любых гроз и сухих гроз, а также ПГС и ПГ от времени.

Их анализ показал, что сухие грозы над изучаемыми пунктами наблюдались только в месяцы с июня по август, хотя прочие грозы регистрировались также в мае и сентябре. Зависимости их количества от времени представляют собой сложные колебания. При этом наиболее мощная квазидвухлетняя мода их спектра, характерная также для собственной изменчивости многих характеристик атмо-

сферы, практически маскирует все прочее. Для выявления зависимостей от времени суммы прочих мод изучаемых процессов, упомянутую моду необходимо подавить. Для этого осуществлено сглаживание всех сформированных рядов ПГС и ПГ в скользящем окне длиной пять лет.

Как примеры на рис. 2 приведены зависимости от времени количества любых гроз и сухих гроз, соответствующих июню и июлю, а также всему грозоопасному сезону, а также ПГС и ПГ для всего этого сезона, которые сглажены в скользящем окне длиной пять лет, для п. Ленск (Якутия).

Из рис. 2 видно, что между одноимёнными зависимостями от времени количества всех гроз (КГ) и сухих гроз (КГС) для пункта Ленск имеет место существенное подобие. Все рассматриваемые зависимости являются возрастающими, а присутствующие в них тренды весьма близки к линейным.

Столь же подобны аналогичные зависимости, соответствующие прочим рассматриваемым пунктам, хотя присутствующие в них тренды линейными не являются.

Подобие одноимённых зависимостей от времени ПГС и ПГ для месяцев июнь–август, а также в целом за грозоопасный сезон подтверждает табл. 2, где представлены значения коэффициента корреляции соответствующих временных рядов.

Из табл. 2 следует, что значения коэффициента корреляции временных рядов ПГС и ПГ для всего грозоопасного сезона и для каждого его месяца, соответствующие всем рассматриваемым пунктам, кроме пункта Вилуйск, превышают 0,25 (выбранный порог их значимости). Для пункта Вилуйск значение этого коэффициента для июня равно 0,242, для прочих летних месяцев и сезона в целом также превышает 0,25.

Следовательно, связи между соответствующими временными рядами могут быть признаны значимыми для всех месяцев и грозоопасного сезона в целом, а также для всех рассматриваемых пунктов, кроме пункта Вилуйск для июня.

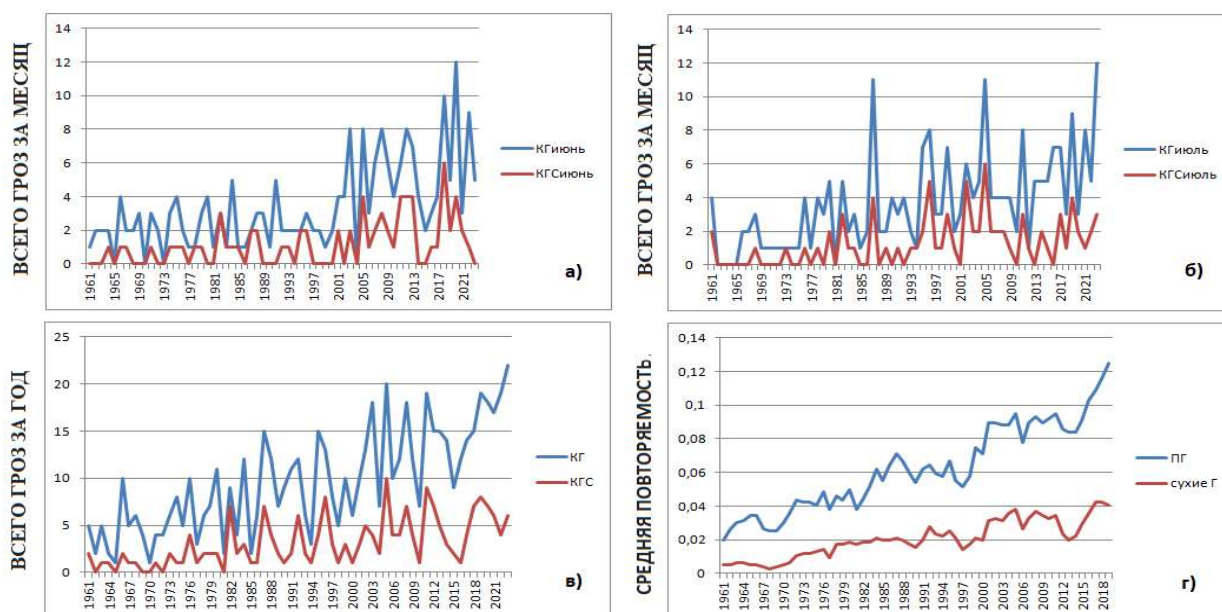


Рис. 2. Межгодовые изменения КГ и КГС над городом Ленск

а) количество гроз за июнь; б) количество гроз за июль; в) количество гроз за год (грозоопасный сезон); г) СПГ и ПГ за тот же сезон, оценённые в скользящем окне длиной 5 лет

Fig. 2. Interannual variations in the number of thunderstorms (TN) and dry thunderstorms (DTR) over the city of Lensk
а) TN in June; б) TN in July; в) TN during a year (thunderstorm season); г) recurrence of dry thunderstorms (DTR) and recurrence of thunderstorms (TR) during the same season, estimated using a sliding window with a length of 5 years

Таблица 2. Значения коэффициента корреляции временных рядов ПГС и ПГ для всех репрезентативных пунктов Якутии и Красноярского края

Table 2. Values of the correlation coefficient of the DTR and TR time series for all representative locations in Yakutia and Krasnoyarsk Krai

Пункт	Июнь	Июль	Август	Лето
Алдан	0,291	0,613	0,559	0,621
Верхоянск	0,517	0,899	0,883	0,710
Вилуйск	0,242	0,542	0,589	0,725
Ленск	0,711	0,765	0,514	0,845
Оймякон	0,544	0,762	0,695	0,711
Сангар	0,525	0,453	0,489	0,720
Якутск	0,572	0,554	0,454	0,595
Ванавара	0,499	0,733	0,549	0,738
Туруханск	0,581	0,455	0,300	0,652

Зависимости от времени ПГ и ПГС для всего грозоопасного сезона над репрезентативными пунктами Якутии, которые сглажены в скользящем окне длиной пять лет, приведены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что зависимости от времени сглаженных в скользящем окне длиной пять лет изменений ПГ

и ПГС для всего грозоопасного сезона, которые соответствуют всем рассматриваемым пунктам, носят колебательный характер. При этом рис. 3, а показывает, что тренды, присутствующие в этих зависимостях, для пункта Алдан, как и для пункта Ленск, близки к линейным.

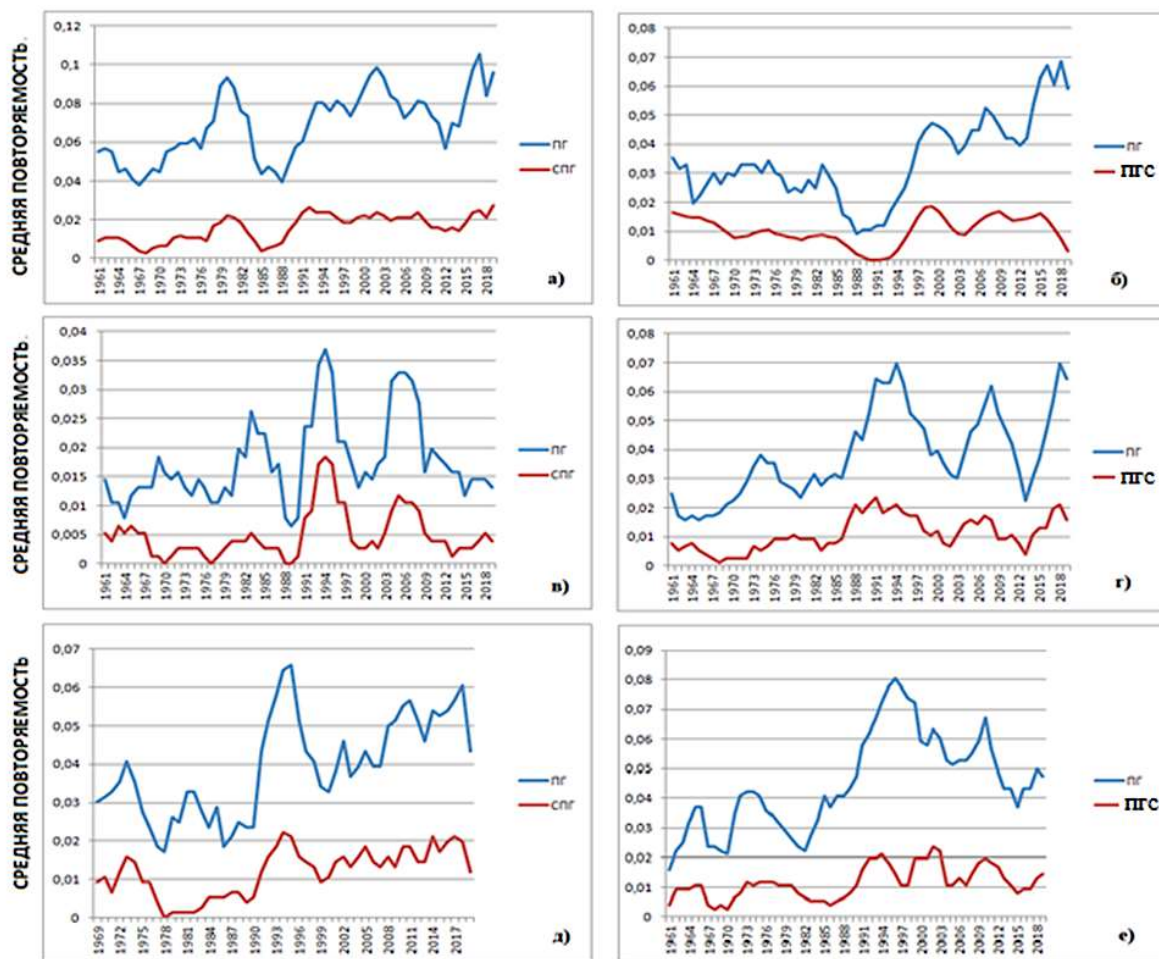


Рис. 3. Зависимости от времени сглаженных в скользящем окне длиной пять лет изменений ПГ и ПГС для всего грозоопасного сезона над репрезентативными пунктами Якутии

a) Алдан; б) Оймякон; в) Верхоянск; г) Виллюйск; д) Сангар; е) Якутск

Fig. 3. Time dependences of TR and DTR changes smoothed in a 5-year sliding window for the entire thunderstorm season over representative locations in Yakutia

a) Aldan; b) Oymyakon; c) Verkhoyansk; d) Vilyuy; e) Sangar; f) Yakutsk

Рис. 3, б свидетельствует о том, что для пункта Оймякон тренды, присутствующие в тех же зависимостях, являются билинейными. Для базового климатического периода 1961–1990 гг. они являются убывающими, а для современного климатического периода 1991–2020 гг. – возрастающими.

Как следует из рис. 3, в, для пункта Верхоянск рассматриваемые тренды также являются билинейными, но возрастающими они являются в период 1961–1993 гг., а в последующий период убывающими.

Рис. 3, г позволяет заключить, что для пункта Виллюйск изучаемые тренды также билинейны. В период 1961–1990 гг. они

возрастающие, а после 1991 г. значимыми не являются (колебания происходят на практически неизменном уровне).

Как видно из рис. 3, д, изучаемые тренды, соответствующие пункту Сангар, близки к линейным.

Из рис. 3, е следует, что для пункта Якутск рассматриваемые тренды также являются билинейными. Для базового климатического периода 1961–1990 гг. они являются возрастающими, а для современного климатического периода 1991–2020 гг. – убывающими.

Таким образом, из рис. 3 следует, что для рассматриваемых частей территории

Якутии тенденции изменений ПГС и ПГ, характерные для современного климатического периода (1991–2020 гг.), различны.

Для пунктов Алдан, Оймякон и Сангар эти тенденции являются возрастающими, а для пунктов Верхоянск и Якутск убывающими.

Как видим, тенденции изменений рассматриваемых показателей в период 2012–2023 гг. существенно различаются.

Оценки за 2012–2023 гг. значений углового коэффициента линейного тренда сглаженных изменений ПГС и ПГ для всего грозоопасного сезона, соответствующие рассматриваемым пунктам и являющиеся значимыми, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Оценки за 2012–2023 гг. значений углового коэффициента линейного тренда сглаженных изменений ПГС и ПГ для всего грозоопасного сезона, соответствующие рассматриваемым пунктам и являющиеся значимыми

Table 3. The 2012–2023 estimates of the values of the angular coefficient of the linear trend in the smoothed DTR and TR changes for the entire thunderstorm season; the estimates correspond to the studied locations and are significant

Пункт	Тренд ПГ	Тренд СПГ
Алдан	0,00562	0,00185
Верхоянск	-0,00042	0,00028
Ленск	0,00621	0,00354
Якутск	0,00036	-0,00025
Оймякон	0,00349	-0,00148
Вилуйск	0,00650	0,00201
Сангар	0,00031	0,00013

Табл. 3 показывает, что для периода 2012–2023 гг. значимые тенденции к увеличению ПГ, которые оценены за весь грозоопасный сезон, соответствуют участкам территории всего бассейна реки Лена, а также Оймяконского нагорья. При этом значимые тенденции к увеличению ПГС за те же годы выявлены для лишь Алданского нагорья, Приленского плато, а также бассейнов рек Яна и Виллой. Следовательно, на территориях соответствующих районов Якутии вклады в горимость их лесов, обусловленные возникновением над ними сухих гроз, в современном периоде увеличиваются.

Аналогичные особенности характерны для сглаженных зависимостей от времени СПГ и ПГ за весь грозоопасный сезон, соответствующих репрезентативным пунктам Красноярского края. Упомянутые зависимости представлены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, для репрезентативных пунктов Красноярского края зависимости от времени сглаженных в скользящем окне длиной пять лет изменений ПГ и ПГС для всего грозоопасного сезона также являются сложными колебаниями. При этом для пункта Ванавара присутствующие в них тренды являются билинейными (для базового климатического периода убывающими, а для современного климатического периода возрастающими). Для пункта Туруханск тренды, присутствующие в обеих зависимостях, близки к линейным.

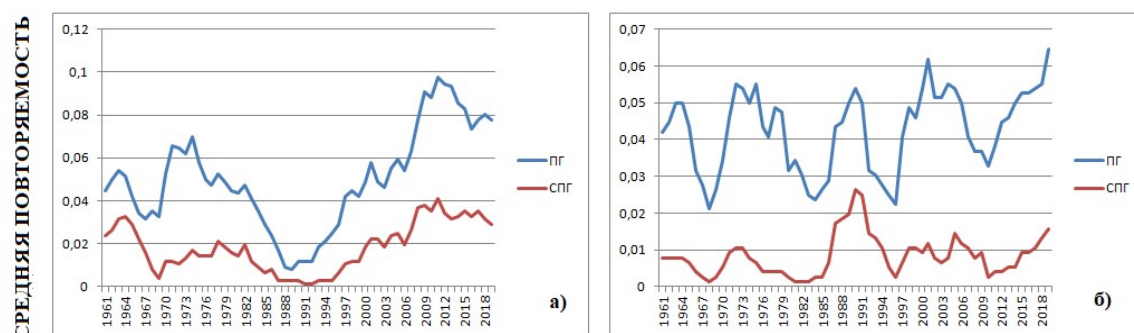


Рис. 4. Зависимости от времени сглаженных в скользящем окне длиной пять лет изменений ПГ и ПГС для всего грозоопасного сезона, соответствующие репрезентативным пунктам Красноярского края:

а) Ванавара; б) Туруханск

Fig. 4. Time dependences of TR and DTR changes smoothed in a 5-year sliding window for the entire thunderstorm season, in correspondence with the representative locations of the Krasnoyarsk Krai: а) Vanavara; б) Turukhansk

Таблица 4. Оценки климатических норм ПГ и ПГС для летних месяцев в изучаемых пунктах Якутии и Красноярского края для базового и современного климатического периода

Table 4. Estimates of TR and DTR climatic norms for summer months in the studied locations of Yakutia and Krasnoyarsk Krai for the baseline and current climatological periods

Пункт	1961–1990 гг.						1991–2020 гг.					
	Всего гроз			Сухих гроз			Всего гроз			Сухих гроз		
	июнь	июль	август	июнь	июль	август	июнь	июль	август	июнь	июль	август
Алдан	83	106	57	18	21	6	114	150	82	32	42	22
Верхоянск	28	27	14	5	6	4	32	44	16	11	17	2
Вилуйск	44	45	33	10	15	7	81	87	44	27	26	13
Ленск	62	67	51	19	18	15	135	140	74	49	55	22
Оймякон	45	61	22	13	28	4	73	76	34	20	24	11
Сангар	45	52	28	8	6	9	74	89	50	26	31	15
Якутск	56	58	25	14	13	7	80	112	60	27	28	14
Ванавара	66	80	53	26	27	19	95	98	52	36	38	20
Туруханск	35	86	49	3	15	7	61	94	48	13	28	8

Для периода 2012–2023 гг. значимые тенденции к увеличению как ПГ, так и ПГС за весь грозоопасный сезон выявлены лишь для п. Туруханск. Следовательно, вклад в горимость лесов западных предгорий Среднесибирского плоскогорья, обусловленный возникновением над ними сухих гроз, в современном периоде значимо увеличивается.

В табл. 4 для всех рассматриваемых пунктов приведены оценки климатических норм ПГ и ПГС для летних месяцев, соответствующие базовому (1961–1990 гг.) и современному (1991–2020 гг.) климатическому периоду.

Из табл. 4 следует, что за период 1961–2020 гг. климатические нормы ПГ для всех рассматриваемых пунктов и всех летних месяцев увеличились.

Климатические нормы ПГС, соответствующие всем пунктам, повысились для месяцев июнь и июль. Для августа они возросли для всех пунктов, кроме пункта Верхоянск.

Следует отметить, что климатические нормы ПГС для июня, соответствующие всем репрезентативным пунктам, кроме пункта Оймякон, по сравнению с климатическими нормами ПГ в современном климатическом периоде, увеличились более существенно.

Для июля климатические нормы ПГС для пунктов Алдан, Верхоянск, Ленск, Сангар и Якутск за период 1961–2020 гг. возросли более ощутимо, чем климатические нормы ПГ. Максимальное их увеличение и для июня, и для июля имело место для п. Сангар.

Для августа аналогичное явление выявлено для п. Алдан, Вилуйск, Ленск и Оймякон. Наибольшее увеличение климатических норм ПГС, по сравнению с климатическими нормами ПГ, для этого месяца имело место для п. Алдан.

Так как сухие грозы, проходя над лесными массивами, способны чаще вызывать в них лесные пожары, из полученных результатов следует, что вклады этих атмосферных процессов в суммарную горимость лесов районов Якутии и Красноярского края, для которых изучаемые пункты являлись репрезентативными, в современном климатическом периоде существенно увеличились.

Из сравнения табл. 4 и 3 понятно, что для репрезентативных пунктов Алданского нагорья, бассейнов рек Яна и Вилуй и Приленского плато значимые тенденции к увеличению ПГС выявлены для трёх периодов времени (1961–2020 гг., 1991–2020 гг. и 2012–2023 гг.), что позволяет предполагать их устойчивость. По-

следнее свидетельствует о том, что сценарий будущего, при котором увеличение СПГ в тех же районах продолжится, является вполне вероятным.

Аналогичный вывод справедлив и для западных предгорий Среднесибирского плоскогорья.

При решении третьей задачи осуществлён корреляционный анализ связей между временными рядами ПГ и ПГС за 1961–2023 гг., а также синхронными, по отношению к ним, рядами СМТ, для всего грозоопасного сезона и каждому его месяцу, которые соответствуют всем рассматриваемым пунктам территорий Якутии и Красноярского края. Полученные результаты для пунктов Ленск и Туруханск представлены в табл. 5.

Как видно из табл. 5, для пунктов Ленск и Туруханск связи между синхронными временными рядами ПГ и СМТ, соответствующими июню, а также всему грозоопасному сезону, могут быть признаны значимыми с достоверностью не менее 0,95. Такой же вывод справедлив и в отношении связей между синхронными временными рядами ПГС и СМТ для пункта Туруханск, соответствующими июню, а также всему грозоопасному сезону.

Связи между рассматриваемыми рядами для прочих месяцев значимыми не являются.

Аналогичные закономерности выявлены и для прочих рассматриваемых репрезентативных пунктов. Месяцем, для которого корреляция рядов ПГС и СМТ является значимой для наибольше-

го количества пунктов, является июнь. Для прочих месяцев связи между этими рядами для всех пунктов значимыми не являются. Связи между рядами ПГС и СМТ для всего грозоопасного сезона значимы лишь для пунктов Алдан, Верхоянск и Туруханск.

Из этого следует, что существенное влияние на вариации ПГС, происходящие над изучаемыми районами Якутии и Красноярского края, оказывают межгодовые изменения не только температур приземного воздуха, но и его относительной влажности и другие факторы.

Как уже отмечалось выше, одной из причин изменений относительной влажности воздуха над лесными массивами рассматриваемых районов могут являться вариации характеристик их фитоценозов, влияющих на интенсивность транспирации ими влаги.

Определённое влияние на изменения ПГС над такими районами, вероятно, могут оказывать также вариации суммарных продолжительностей, проходящих над ними вторжений в низкие широты относительно сухого арктического воздуха, а также других процессов, порождающих атмосферные блокинг [34].

Таким образом, установлено, что выдвинутая гипотеза является справедливой для районов Якутии и Красноярского края, по отношению к которым рассматриваемые пункты являются репрезентативными, поэтому задачи, поставленные в данной работе, решены, а её цель достигнута.

Таблица 5. Значения коэффициента корреляции временных рядов ПГ и ПГС за 1961–2023 гг. для пунктов Ленск и Туруханск, с синхронными рядами СМТ для этих пунктов, которые соответствуют всему грозоопасному сезону, а также каждому его месяцу

Table 5. Correlation coefficient values of TR and DTR time series for 1961–2023 with regard to the Lensk and Turukhansk locations, with synchronous series of mean monthly air temperatures (MMT) for these locations, which correspond to the entire thunderstorm season and each individual month of the season

Пункт	ПГ				ПГС			
	июнь	июль	август	сезон	июнь	июль	август	сезон
Ленск	0,412	0,147	0,208	0,415	0,208	-0,098	-0,238	0,226
Туруханск	0,308	0,198	-0,092	0,284	0,289	0,146	0,016	0,256

Обсуждение полученных результатов

Полученные результаты качественно соответствуют существующим представлениям о влиянии вариаций температур воздуха в приземном слое земной атмосферы на грозовую активность [2, 11, 12, 14–22], механизме образования сухих гроз [1, 2, 4, 26], а также об особенностях перемен климата Якутии и Красноярского края, которые произошли за период 1961–2020 гг. [28, 30].

При этом новыми фактами, установленными в работе, являются:

1. Для каждого месяца, в котором возможно образование сухих гроз, на территориях Якутии и Красноярского края существуют многочисленные районы, где за весь период современного потепления глобального климата (1961–2020 гг.) [25], за современный климатический период (1991–2020 гг.), а также 2012–2023 гг. ПГС значительно возросли.

2. Статистические связи межгодовых изменений ПГС с синхронными вариациями СМТ являются значимыми не повсеместно и лишь, при условии, что рассматриваемые показатели оценены за весь грозоопасный сезон, а также за июнь. Для прочих месяцев они значимыми где-либо не являются. Последнее доказывает, что наряду с термическими факторами на межгодовые и сезонные изменения ПГС значимо влияют также другие (предположительно, ландшафтные) факторы.

3. Изменения ПГС представляют собой сложные колебания, причины которых нуждаются в дополнительном изучении.

Одной из возможных их причин могут быть изменения вулканической активности в различных районах Земного шара, влияющие на прозрачность атмосферы, в том числе и над регионами Северного умеренного климатического пояса.

Другой причиной колебаний ПГС могут служить вариации солнечной активности, которые вызывают изменения потоков космических лучей, входящих в атмосферу и усиливающих ионизацию воздуха в тропосферных облаках.

В XXI веке всё более мощным фактором, влияющим на изменения ПГ и ПГС, становится перемещение Северного геомагнитного полюса, которое, в сочетании с общим ослаблением геомагнитного поля, приводит к увеличению потока космических лучей, проникающих в тропосферу, по мере сокращения расстояния, отделяющего его от территории Якутии и Красноярского края.

Вследствие нестационарности перечисленных факторов, периодичности, присутствующие в вариациях ПГ и ПГС над рассматриваемыми пунктами устойчивыми не являются, что подтвердил и спектральный анализ соответствующих временных рядов. Результаты этого анализа для всех репрезентативных пунктов отдать предпочтение какой-либо из указанных причин не позволяют.

Выводы

Выявленные закономерности межгодовых изменений повторяемости сухих гроз для всего грозоопасного сезона и рассматриваемых пунктов на территориях Республики Саха (Якутия) и Красноярского края в полной мере соответствуют существующим представлениям о причинах этих процессов.

1. Среди участков территорий упомянутых регионов, для которых исследуемые пункты могут рассматриваться как репрезентативные, существуют те, где за период современного потепления глобального климата, за весь современный климатический период, а также за интервал времени 2012–2023 гг. повторяемость сухих гроз значительно повышалась.

2. В период современного потепления глобального климата межгодовые изменения повторяемости сухих гроз, а также синхронные вариации среднемесячных температур воздуха значимо связаны между собой не всюду и лишь при условии, что указанные показатели соответствуют либо всему грозоопасному сезону, либо июню. В прочих случаях связи между этими процессами не значимы.

Актуальной проблемой в области прогнозирования повторяемости сухих гроз

и вызванных ими лесных пожаров на территориях Республики Саха (Якутия), а также Красноярского края, является со-

вершенствование технологий мониторинга относительной влажности воздуха в под-облачном слое тропосферы над ними.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дмитриев А. Н., Кречетова С. Ю., Кочеева Н. А. Грозы и лесные пожары от гроз на территории Республики Алтай: монография. Горно-Алтайск: Горно-Алтайский государственный университет, 2011. 154 с. EDN: QKKRQF
2. Иванов В. А., Кориунов Н. А., Матвеев П. М. Пожары от молний в лесах Красноярского Приангарья: монография. Красноярск: СибГТУ, 2004. 132 с. EDN: QKWXMВ
3. Курбатский Н. П. О механизме возникновения лесных пожаров от молний // Лесоведение. 1976. № 3. С. 95–98.
4. Парамонов Е. Г., Ииутин Я. Н. Крупные лесные пожары в Алтайском крае: монография, 2-е издание, исправленное и дополненное. Барнаул: Алтайский государственный университет, 2005. 240 с. EDN: YPSALB
5. Биogeосистемы лесов и вод России: монография / И. В. Стебаев, Ж. Ф. Пивоварова, Б. С. Смоляков и др. Новосибирск: Новосибирское отделение издательства «Наука», 1993. 348 с. EDN: XUCRSH
6. Страхов В. В., Писаренко А. И., Борисов В. А. Леса мира и России // Бюллетень «Использование и охрана природных ресурсов в России». 2001. № 9. С. 49–63.
7. The Siberian World / Edited by J. P. Ziker, J. Ferguson, V. Davydov. Abingdon, Oxon; New York, NY: Routledge, 2023. 654 p. DOI: 10.4324/9780429354663
8. Схемы расположения Зон контроля в субъектах Российской Федерации. URL: <https://aviales.ru/default.aspx?textpage=229> (дата обращения: 15.03.2024).
9. Берг Л. С. Географические зоны Советского Союза, изд. 3. М.: Географгиз, 1947. Т. 1. 397 с.; М.: Географгиз, 1952. Т. 2. 511 с.
10. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Лесные пожары на территории России: состояние и проблемы: монография / под общей редакцией Ю. Л. Воробьева. М.: «Дэкс-Пресс», 2004. 312 с. EDN: UCSYVJ
11. Козлов В. И., Муллаяров В. А. Грозовая активность в Якутии: монография. Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2004. 103 с. EDN: QKESHP
12. Филиппов А. Х. Грозы Восточной Сибири. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 75 с.
13. Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства: официальный сайт. URL: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (дата обращения: 15.03.2024).
14. Ермаков В. И., Стожков Ю. И. Физика грозových облаков: монография. М.: Препринт ФИАН РФ, 38 с. EDN: QKENLL
15. Иванов В. А. Грозы и лесные пожары // Лесные пожары и их последствия. Красноярск: ИЛ и ДСОАН СССР, 1985. С. 38–46.
16. Иньков В. К., Махоткин Л. Г. Широтные особенности грозовой деятельности // Труды ГГО. Атмосферное электричество. 1981. Вып. 442. С. 34–38.
17. Грозы в Якутии и их влияние на магистральные трубопроводы / В. И. Козлов, В. А. Муллаяров, А. Е. Васильев и др. // Наука и образование. 2005. № 1. С. 61–66. EDN: KATNZR
18. Козлов В. И., Муллаяров В. А. Инструментальные наблюдения грозовой активности в Якутии в 1993–1994 гг. // Метеорология и гидрология. 1996. № 2. С. 105 – 109.
19. Козлов В. И., Муллаяров В. А., Соловьев В. С. Лесные пожары в Якутии от гроз // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6, № 2. С. 388–393. EDN: NDPYFT
20. Козлов В. И., Муллаяров В. А., Каримов Р. Р. Пространственное распределение плотности грозových разрядов на Востоке России по данным дистанционных наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 3. С. 257–262. EDN: OGAPBX
21. Тарасов Л. В. Ветры и грозы в атмосфере Земли. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 277 с. EDN: QKKHNNX
22. Шахаева Е. В. Конвективные явления на территории Иркутской области в 2000–2013 гг // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2015. Т. 12. С. 136–152. EDN: TJANYZ
23. Коровин Г. Н., Зукерт Н. В. Влияние климатических изменений на лесные пожары в России // Климатические изменения: взгляд из России / под ред. В. И. Данилова-Данильяна. М.: ТЕИС, 2003. С. 69–98. URL: <http://www.priroda.ru/lib/detail.php?ID=5082> (дата обращения: 15.03.2024).
24. К оценке изменений пожароопасной обстановки в лесах России при ожидаемом потеплении климата в XXI веке / С. П. Малевский-Малевич, Е. К. Молькентин, Е. Д. Надежина и др. // Метеорология и гидрология. 2005. № 3. С. 36–44. EDN: KUNKWF
25. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/lncs> (дата обращения: 15.03.2024)
26. Столярчук Л. В., Камышианова В. А. Условия возникновения массовых лесных пожаров от гроз // Труды ГГО. Атмосферное электричество. 1984. Вып. 474. С. 120–126.
27. Столярчук Л. В., Камышианова В. А. Повторяемость лесных пожаров и их связь с фор-

мами атмосферной циркуляции // Труды ГГО. Атмосферное электричество. 1984. Вып. 474. С. 126–129.

28. Анисимов О. А., Жильцова Е. Л. Об оценках изменений климата регионов России в XX в. и начале XXI в. по данным наблюдений // Метеорология и гидрология. 2012. № 6. С. 95–107. EDN: OYSLAR

29. Васильев И. С., Торговкин Я. И. Пространственное распределение осадков в Якутии // Метеорология и гидрология. 2002. № 6. С. 23–32. EDN: SBOGNR

30. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: В 3-х томах / Г. В. Алексеев, М. Д. Ананичева, О. А. Анисимов

и др. Том 1–3. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с. EDN: UKLXXH

31. Банк данных об изменениях метеоусловий в различных регионах мира. URL: <https://en.tutiempo.net/climate> (дата обращения: 15.03.2024).

32. Национальный атлас России. В 4 томах. Том 2. Природа и экология / под ред. В. М. Котлякова. М.: ПКО «Картография», 2007. 495 с.

33. Григорьев А. А. Закономерности строения и развития географической среды: Избранные теоретические работы. М.: Мысль, 1966. 384 с.

34. Атмосферные блокингиды над Сибирью и лесные пожары на её территории в 2012–2020 гг. / А. В. Холопцев, И. Ю. Сергеев, А. Н. Батуро и др. // Техносферная безопасность. 2022. № 4 (37). С. 3–17. EDN: JWNSCW

Статья поступила в редакцию 22.03.2024; одобрена после рецензирования 05.06.2024; принята к публикации 05.06.2024

Информация об авторе

ХОЛОПЦЕВ Александр Вадимович – доктор географических наук, профессор кафедры контрольно-надзорной деятельности, Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. Область научных интересов – лесное хозяйство, экология, климатология, безопасность при чрезвычайных ситуациях. Автор более 207 научных публикаций. SPIN-код: 2419-5410

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 502.313

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.82>

EDN: CXOYBY

Changes in the Recurrence of Dry Thunderstorms under Modern Climate Warming on the Example of Some Regions of Yakutia and Krasnoyarsk Krai

A. V. Kholoptsev

Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia,
1, Severnaya St., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation
knd@sibpsa.ru

Abstract. Introduction. The distinguishing characteristic of dry thunderstorms is the absence of precipitation accompanying these weather events, which contributes to the intensity and spread of wildfires induced by lightning strikes igniting combustible materials. In forested but unpopulated areas, dry thunderstorms are the main cause of fires. It is generally accepted that their recurrence increases with increasing aridity of the local climate. However, the features of changes in dry thunderstorm frequency in certain forest-rich regions of Russia under modern climate warming have not been sufficiently studied yet. Therefore, identification of these changes for regions located in Siberia is a topical issue of ecology and safety in emergency situations. *The aim* of the work was to identify the trend in interannual variations in the recurrence of dry thunderstorm events during summer months and overall thunderstorm seasons for the period of 1961–2023 with regard to Yakutia and Krasnoyarsk Krai. *Objects and methods of research.* The objects of the study were changes in dry thunderstorm frequency and mean monthly air temperatures in the surface layer of the atmosphere assessed during the months of the 1961–2023 thunderstorm seasons. The study was carried out using the correlation analysis method and Student's test. *Results.* It was found that the trends of interannual changes in the recurrence of dry thunderstorms are determined not only by the local climate variations, but also by the geographical location of the studied areas. For the sites located on the Prilensky Plateau and in the basins of the Lena and Yana Rivers, during any of the summer months within the period under study, the climatic norms of dry thunderstorm recurrence increased much faster than those of recurrence of all thunderstorm events. This peculiarity was not observed in the areas located on the Oymyakonsky Plateau and the Middle Siberian Plateau. *Conclusion.* The study showed that the synchronous correlation of variations in the recurrence of dry thunderstorms and the thermic regime of the territory is not significant for all locations, which indicates the presence of substantial influence of other factors, presumably landscape ones.

Keywords: dry thunderstorm; forest fire; recurrence; emergency situation; the Republic of Sakha (Yakutia); the Krasnoyarsk Krai; trend; synchronous communication

Funding: this study was not supported by any external sources of funding.

For citation: Kholoptsev A. V. Changes in the Recurrence of Dry Thunderstorms under Modern Climate Warming on the Example of Some Regions of Yakutia and Krasnoyarsk Krai. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*. 2024;(2):82–97. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.82>; EDN: CXOYBY

REFERENCES

1. Dmitriev A. N., Krechetova S. Yu., Kocheeva N. A. Thunderstorms and forest fires from thunderstorms on the territory of the Altai Republic. Monograph. Gorno-Altaysk: GASU Publ.; 2011. 154 p. EDN: QKKRQF (In Russ.).
2. Ivanov V. A., Korshunov N. A., Matveev P. M. Lightning-induced fires in the forests of the Krasnoyarsk Angara Region. Monograph. Krasnoyarsk: SibSTU Publ.; 2004. 132 p. EDN: QKWXMB (In Russ.).
3. Kurbatsky N. P. On the mechanism of forest fire generation by lightning. *Russian Journal of Forest Science (Lesovedenie)*. 1976;(3):95–98. (In Russ.).
4. Paramonov E. G., Ishutin Ya. N. Large Forest fires in the Altai Territory. Monograph. 2nd ed., revised and enlarged. Barnaul: Altai State University; 2005. 240 p. EDN: YPSALB (In Russ.).
5. Stebaev I. V., Pivovarova J. F., Smolyakov B. S. et al. Biogeosystems of the forests and waters of Russia. Monograph. Novosibirsk: Novosibirsk Branch of the Publishing House "Nauka"; 1993. 348 p. EDN: XUCRSH (In Russ.).
6. Strakhov V. V., Pisarenko A. I., Borisov V. A. Forests of the world and Russia. *Use and Protection of Natural Resources of Russia*. 2001;(9):49–63. (In Russ.).
7. The Siberian World. 1st ed. Ziker J. P., Ferguson J., Davydov V. (eds.). Abingdon, UK and New York, USA: Routledge; 2023. 654 p. DOI: 10.4324/9780429354663
8. Location maps of Control Zones in the regions of the Russian Federation. Available from: <https://aviales.ru/default.aspx?textpage=229> [Accessed 15 March 2024]. (In Russ.).
9. Berg L. S. Geographical zones of the Soviet Union. 3rd ed. Moscow: Ogiz-Geografiz; Vol. 1. 1947. 397 p.; Vol. 2. 1952. 511 p. (In Russ.).
10. Vorobyov Yu. L., Akimov V. A., Sokolov Yu. I. Forest fires in Russia: state and problems. Monograph. Vorobyov Yu. L. (gen. ed.). Moscow: Dex-Press; 2004. 312 p. EDN: UCSYVJ (In Russ.).
11. Kozlov V. I., Mullayarov V. A., Kozlov V. I. et al. Thunderstorm activity in Yakutia. Monograph. Yakutsk: The Yakut Branch of the Publishing House of SB RAS; 2004. 103 p. EDN: QKECHP (In Russ.).
12. Filippov A. H. Thunderstorms of Eastern Siberia. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1974. 76 p. (In Russ.).
13. Information system of remote monitoring of the Federal Forestry Agency. Fire danger monitoring unit. Available from: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml [Accessed 15 March 2024]. (In Russ.).
14. Ermakov V. I., Stozhkov Yu. I. Physics of thunderclouds. Monograph. Moscow: Preprint LPI RAS; 2004. 38 p. EDN: QKEHLL (In Russ.).
15. Ivanov V. A. Thunderstorms and forest fires. In: *Forest fires and their consequences: collection of papers*. Kurbatsky N. P. (ed.). Krasnoyarsk: The Institute of Forest and Wood SB USSR Academy of Sciences; 1985:38–46. (In Russ.).
16. Inkov V. K., Makhotkin L. G. Latitudinal features of thunderstorm activity. *Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory. Atmospheric Electricity*. 1981;(442):34–38. (In Russ.).
17. Kozlov V. I., Mullayarov V. A., Vasiliev A. E. et al. Thunderstorms in Yakutia and their influence on main pipelines. *Science and Education*. 2005;(1):61–66. EDN: KATNZR (In Russ.).
18. Kozlov V. I., Mullayarov V. A. Instrumental observations of thunderstorm activity in Yakutia in 1993–1994. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 1996;(2):105–109. (In Russ.).
19. Kozlov V. I., Mullayarov V. A., Solovyov V. S. Forest fires in Yakutia from thunderstorms. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2009;6(2):388–393. EDN: NDPYFT (In Russ.).
20. Kozlov V. I., Mullayarov V. A., Karimov R. R. The spatial distribution of the lightning in the east of Russia on remote sensing data. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2011;8(3):257–262. EDN: OGAPBX (In Russ.).
21. Tarasov L. V. Winds and thunderstorms in the Earth's atmosphere. Dolgoprudny: Intellect Publ.; 2011. 277 p. EDN: QKKHXX (In Russ.).
22. Shakhbaeva E. V. Convective phenomena on the territory of Irkutsk Region in 2000–2013. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series "Earth Sciences"*. 2015;12:136–152. EDN: TJAHYZ (In Russ.).
23. Korovin G. N., Zukert N. V. The impact of climate change on forest fires in Russia. In: *Climate change: a view from Russia*. Danilov-Danilyan V. I. (ed.). Moscow: TEIS, 2003:69–98. EDN: QKDXUR (In Russ.).
24. Malevsky-Malevich S. P., Molkentin E. K., Nadyozhina E. D. et al. On the assessment of changes in the fire-hazardous situation in the forests of Russia with the expected climate warming in the XXI century. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2005;(3):36–44. EDN: KUHWWF (In Russ.).
25. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Available from: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/lncs> [Accessed 15 March 2024].

26. Stolyarchuk L. V., Kamyshanova V. A. Conditions of occurrence of massive forest fires from thunderstorms. *Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory. Atmospheric Electricity*. 1984;(474):120–126. (In Russ.).
27. Stolyarchuk L. V., Kamyshanova V. A. The recurrence of forest fires and their connection with forms of atmospheric circulation. *Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory. Atmospheric Electricity*. 1984;(474):126–129. (In Russ.).
28. Anisimov O. A., Zhil'tsova E. L. Climate change estimates for the regions of Russia in the 20th century and in the beginning of the 21st century based on the observational data. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2012;37(6):421–429. DOI: 10.3103/S1068373912060106. EDN: RGDAQH (In Russ.).
29. Vasiliev I. S., Torgovkin Ya. I. Spatial distribution of precipitation in Yakutia. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2002;(6):23–32. EDN: SBOG NR (In Russ.).
30. Alekseev G. V., Ananicheva M. D., Anisimov O. A. et al. Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation. In 3 volumes. Vol. 1. Moscow: Roshydromet, 2014. 1009 p. EDN: ZEPEGI (In Russ.).
31. Global climate data. Available from: <https://en.tutiempo.net/climate> [Accessed 15 March 2024].
32. The National atlas of Russia. Kotlyakov V. M. (ed.). In 4 volumes. Vol. 2: *Nature. Ecology*. Moscow: Roskartografiya; 2007. 495 p. (In Russ.).
33. Grigoriev A. A. The regularities of structure and development of the geographical environment. *Selected theoretical works*. Moscow: Mysl'; 1966. 382 p. (In Russ.).
34. Kholoptsev A. V., Sergeev I. Y., Baturo A. N. et al. Atmospheric blockings over Siberia and forest fires on its territory at 2012–2020 yrs. *Technosphere Safety*. 2022;(4(37)):3–17. EDN: JWN SCW (In Russ.).

The article was submitted 22.03.2024; approved after reviewing 05.06.2024;
accepted for publication 05.06.2024

Information about the author

Alexander V. Kholoptsev – Doctor of Geographical Sciences, Professor of the Department of Control and Supervisory Activities, Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia. Research interests – forestry, ecology, climatology, safety in emergency situations. Author of more than 207 scientific publications. SPIN: 2419-5410

Conflict of interests: the author declare no conflict of interest.
Author read and approved the final manuscript.