

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 502.45

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-79-94>

Особенности статистических связей межгодовых изменений пожароопасности по условиям погоды в улусах (районах) Якутии с вариациями показателей горимости ее лесов в предыдущие годы



EDN: WEXLSR

А.В. Холопцев , Р.Г. Шубкин , Ю.Н. Коваль Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
г. Железногорск, Российская Федерация✉ khloptsev@mail.ru

Аннотация

Введение. Глобальное потепление климата обостряет проблему ландшафтных пожаров вследствие усиления испарения влаги из горючего материала, увеличения повторяемости сухих гроз, расширения пожароопасного сезона и смещения границ ландшафтных зон. Особую угрозу эти процессы представляют для лесных регионов России, прежде всего для Республики Саха (Якутия). В работах отечественных и зарубежных исследователей установлено значимое влияние межгодовых колебаний среднемесячных температур приземного воздуха (СТВ) на вариации пожарных рисков. Авторами ранее доказано существование во многих районах Сибири положительной обратной связи между показателями горимости лесов и температурными аномалиями последующего года. Однако значимость этой связи на уровне отдельных улусов Якутии, территории которых совпадают с зонами ответственности противопожарных подразделений, ранее не оценивалась, что формирует существенный пробел в научном знании. Целью исследования является восполнение данного пробела путем оценки значимости указанной связи для всех улусов республики и проверки ее устойчивости к временным сдвигам анализируемых рядов.

Материалы и методы. Исследование проводилось с использованием данных за 2000–2024 гг. Как источник информации о распределении СТВ на высоте 2 м над изучаемыми территориями, соответствующими узлам сетки 0,25°, использован реанализ ERA5¹. Как фактический материал о количестве ландшафтных пожаров на территории каждого улуса (района) Якутии и общей площади ее участков, пройденных огнем в тот или иной год из указанного периода, использованы сведения Информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства. Для каждого из 34 улусов (районов) Якутии с учетом информации об СТВ, соответствующей пунктам, для которых в ERA5 представлены такие сведения, вычислены средние СТВ по всей его территории для месяцев с мая по июль. Статистические связи между межгодовыми изменениями средних СТВ за рассматриваемый период и вариациями показателей горимости лесов всей Якутии (опережающими их на один год) исследовались методом корреляционного анализа для различных отрезков времени длительностью 10–20 лет. Перед проведением анализа из сопоставляемых временных рядов удалялись линейные тренды. Значимость корреляционных коэффициентов оценивалась с использованием критерия Стьюдента при уровне достоверности не менее 95 %. Устойчивость выявленных связей проверялась путем изучения их сохранения при временных сдвигах рядов на единицы лет и при изменении длины анализируемых отрезков в пределах 10–20 лет.

Результаты исследования. Установлены улусы (районы) Якутии, для которых статистические связи межгодовых изменений средних СТВ для мая — июля с опережающими их по времени на один год вариациями количества ландшафтных пожаров и площади участков всей территории Якутии, пройденных огнем за каждый из 2000–2023 годов, с достоверностью $\geq 95\%$ признаны значимыми. К ним относятся улусы (районы), расположенные как в северной и западной части территории республики, так и в ее центральной части. Доказана устойчивость выявленных связей к временным сдвигам анализируемых периодов на единицы лет в прошлое и будущее, а также к изменению продолжительности отрезков временных рядов в пределах 10–20 лет. При этом

¹ От англ. Reanalysis.

установлено, что в период 2001–2023 гг. рассматриваемые связи прогрессивно усиливаются: количество улусов и районов, для которых достоверность выводов $\geq 95\%$, увеличилось более чем в два раза, а число территорий, где достоверность $\geq 99\%$, выросло с нуля до 16. Связи изменений СТВ для выявленных улусов (районов) с вариациями количества пожаров на территории Якутии обладают более высокой достоверностью, чем их связи с вариациями площади участков, пройденных огнем за год.

Обсуждение. Полученные результаты подтверждают существование на территории Якутии улусов (районов), для которых влияние на межгодовые изменения СТВ, оказываемое вариациями показателей горимости лесов всей Якутии, опережающими их по времени на 1 год, является значимым. Их новизна состоит в выявлении всех улусов (районов), для которых связи между этими процессами являются значимыми и обладают устойчивостью к временным сдвигам. Выявленная устойчивость обнаруженных связей указывает на фундаментальный характер зависимости: загрязнение снега осевшими на него частицами пожарных аэрозолей снижает альбедо покрытой им подстилающей поверхности, что ускоряет таяние, повышение СТВ и интенсивности испарения, усиливая пожароопасность. За изучаемый период эти связи усилились, что свидетельствует о влиянии потепления климата на активизацию рассматриваемой положительной обратной связи. Поэтому при дальнейшем потеплении климата Якутии они еще более усилятся. Вариации количества ландшафтных пожаров на всей территории Якутии сильнее влияют на изменения СТВ для выявленных улусов (районов), чем вариации площади выгорания. Полученные результаты позволяют использовать показатели горимости лесов всей Якутии предыдущего года как предикторы при долгосрочном прогнозировании СТВ для выявленных ее районов (улусов).

Заключение. Выявлены улусы (районы) Якутии, для которых статистические связи между изменениями показателей горимости лесов на всей территории республики и запаздывающими по отношению к ним на год вариациями СТВ в мае — июле являются значимыми. При достоверности такого вывода $\geq 95\%$ таких улусов (районов) для периода 2015–2024 гг. выявлено 23, а при достоверности $\geq 99\%$ — 16. Доказана устойчивость этих связей к временным сдвигам и длительности временных рядов. Установлено, что за 2001–2024 гг. выявленные связи существенно усилились, что указывает на активизацию в регионе рассматриваемой положительной обратной связи. Поставленные в работе задачи решены: определены расположения улусов (районов) Якутии, а также месяцы, для которых рассматриваемые связи являются наиболее сильными и устойчивыми. Показано также, что количество пожаров на всей территории Якутии служит более информативным предиктором прогностических моделей изучаемого процесса для ее улусов (районов), чем площадь выгорания. Результаты исследования открывают возможность использования результатов мониторинга показателей горимости лесов Якутии для разработки прогнозов на предстоящий год СТВ на территориях выявленных ее улусов (районов) для месяцев май — июль, на которые приходится пик их горимости. Это имеет практическое значение для оптимизации стратегий противопожарного менеджмента в условиях меняющегося климата.

Ключевые слова: возгорания лесов в Саха (Якутия), температура приземного воздуха, горимость лесов, лесопожарный прогноз, пройденная огнем площадь

Для цитирования. Холопцев А.В., Шубкин Р.Г., Коваль Ю.Н. Особенности статистических связей межгодовых изменений пожароопасности по условиям погоды в улусах (районах) Якутии с вариациями показателей горимости ее лесов в предыдущие годы. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2026;10(2):79–94. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-79-94>

Original Theoretical Research

Statistical Relationships between Year-to-Year Changes in Fire Hazard due to Weather Conditions in the Uluses (Districts) of Yakutia and Variations in Forest Fire Rates in Previous Years

Aleksandr V. Kholoptsev , Roman G. Shubkin , Yuliya N. Koval 

Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russian Federation

✉ kholoptsev@mail.ru

Abstract

Introduction. Global climate warming is exacerbating the problem of landscape fires due to increased evaporation of moisture from combustible materials, more frequent dry thunderstorms, extended fire season, and shifting boundaries of landscape zones. These processes pose a particular threat to the forest regions of Russia, especially the Republic of Sakha (Yakutia). Domestic and international researchers have found that year-to-year variations in average monthly surface air temperature (MAT) have a significant impact on variations in fire risks. The authors have previously proved the existence of a positive reverse causality between the indicators of forest fire frequency and temperature anomalies of the following year in many regions of Siberia. However, the significance of this connection at the level of individual

uluses of Yakutia, the territories of which coincide with the areas of responsibility of fire departments, has not previously been assessed. This creates a gap in scientific knowledge. The aim of this research is to fill this gap by assessing the significance of this relationship for all uluses of the republic and checking its resistance to time shifts of the analyzed series.

Materials and Methods. The research was conducted using data from 2000–2024. ERA5 reanalysis was used as a source of information on MAT distribution at a height of 2 m above the studied territories, corresponding to the nodes of the 0.25° grid. Information from the Remote Monitoring Information System of the Federal Forestry Agency was used as factual material on the number of landscape fires in the territory of each ulus (district) of Yakutia and the total area of its sites covered by fire each year during the specified period. For each of the 34 uluses (districts) of Yakutia, we calculated the average MAT for their entire territory for the months from May to July, taking into account MAT information corresponding to points for which such information was provided in ERA5. The statistical relationships between interannual changes in the average MAT for the period under review and variations in forest fires indicators throughout Yakutia (one year ahead) were studied using correlation analysis for various time periods lasting 10–20 years. Linear trends were removed from the time series before performing the analysis. The significance of correlation coefficients was assessed using the Student's criterion with a confidence level of 95% or higher. The stability of these relationships was verified by examining their consistency when the series were shifted by one year and when the analyzed segments were varied between 10 and 20 years in length.

Results. The uluses (districts) of Yakutia were identified, where statistical relationships between interannual changes in the average MAT for May–July, with one-year-ahead variations in the number of landscape fires and the area of fire-affected areas of Yakutia from 2000 to 2023, were found to be significant at a confidence level $\geq 95\%$. These include uluses (districts) located both in the northern and western parts of the republic's territory, as well as in its central part. The stability of the identified relationships was proved to time shifts of the analyzed periods by units of years into the past and future, as well as to changes in the duration of time series segments within 10–20 years. It was also established that during the period from 2001 to 2023, the relationships under consideration gradually strengthened: the number of uluses and districts with reliability of conclusions $\geq 95\%$ increased more than twice, and the number of territories with reliability $\geq 99\%$ rose from zero to 16. The relationship between changes in MAT for the identified uluses (districts) and variations in the number of fires in the territory of Yakutia were more reliable than the relationships with variations in the area of its parts affected by fire.

Discussion. The results confirmed the existence of uluses (districts) on the territory of Yakutia, for which the influence on the interannual changes in MAT exerted by variations in the indicators of forest fires throughout Yakutia, which were 1 year ahead of them in time, was significant. The novelty consisted in identifying all uluses (districts) for which the connections between these processes were significant and resistant to time shifts. The revealed stability of the discovered relationships indicated the fundamental nature of the dependence: contamination of snow by particles of fire aerosols deposited on it reduced the albedo of the underlying surface covered with it, which accelerated melting, increased the temperature and evaporation rate, increasing fire risk. During the period under study, these relationships strengthened, which indicated the influence of climate warming on the activation of the positive reverse causality under consideration. Therefore, with further warming of the climate of Yakutia, they would increase even more. Variations in the number of landscape fires throughout Yakutia had a stronger effect on MAT changes for the identified uluses (districts) than variations in the burned area. The results obtained made it possible to use the indicators of forest fires throughout Yakutia of the previous year as predictors for long-term MAT forecasts for its identified areas (uluses).

Conclusion. Uluses (districts) in Yakutia have been identified, for which the statistical relationship between changes in forest burning rates throughout the republic and annual MAT variations in May — July are significant. With a reliability of $\geq 95\%$ for such uluses (districts) for the period from 2015 to 2024, 23 were identified, and with a reliability of $\geq 99\%$, 16 were identified. The stability of these relationships to time shifts and the duration of time series have been proved. It is established that for 2001–2024, the identified relationships have significantly strengthened, which indicates the activation of the positive reverse causality in question in the region. The tasks set in the work have been solved: the locations of the uluses (districts) of Yakutia have been determined, as well as the months for which the considered relationships are the strongest and most stable. It is also shown that the number of fires on the entire territory of Yakutia serves as a more informative predictor of the prognostic models of the studied process for its uluses (districts) than the burned area. The results of the study suggest that it is possible to use the results of monitoring forest fires in Yakutia to create forecasts for the upcoming year for the identified uluses (districts). This is particularly important for optimizing fire management strategies in a changing climate, as the months of May — July account for the peak of forest fires.

Keywords: forest fires in Sakha (Yakutia), surface air temperature, forest flammability, forest fire forecast, area burned

For Citation. Kholoptsev AV, Shubkin RG, Koval YuN. Statistical Relationships between Year-to-Year Changes in Fire Hazard due to Weather Conditions in the Uluses (Districts) of Yakutia and Variations in Forest Fire Rates in Previous Years. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(2):79–94. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-79-94>

Введение. Долгосрочные прогнозы опасных последствий потепления климата необходимы для повышения эффективности управления деятельностью подразделений и служб, занимающихся их профилактикой и ликвидацией. Поэтому совершенствование методик их долгосрочного прогнозирования для различных месяцев предстоящего года — актуальная проблема безопасности при чрезвычайных ситуациях.

Согласно существующим представлениям о последствиях потепления климата Сибири [1], многие такие процессы способствуют увеличению количества возникающих здесь ландшафтных пожаров (КЛП) и суммарных площадей участков ее территории, пройденных огнем (ППО). Примерами таких процессов могут служить: нарушение гидрологического цикла, вызванное повышением интенсивности испарения влаги из горючего материала, расширение временных рамок пожароопасного сезона [2]. Последствием потепления климата является также смещение ландшафтных границ в более высокие широты [3], а также внедрение в экосистемы инвазивных видов вредителей, ускоряющих образование горючего материала [4]. Следовательно, потепление климата вызывает усиление статистических связей между изменениями среднемесячных температур приземного воздуха над изучаемой территорией (СТВ) и вариациями упомянутых показателей лесной горимости. При этом усиливаются не только прямые связи (повышение СТВ на территориях, покрытых лесами — причина увеличения их горимости), но и обратные. Как показано в [5], возрастание по какой-либо причине горимости лесов Якутии в предыдущем пожароопасном сезоне приводит к увеличению количества пирогенных веществ, поступивших за это время в атмосферу. Ветры южных румбов, преобладающие в осенне-зимние месяцы, распределяют эти вещества по территории Сибири. Пирогенные вещества с осени оседают на снежный покров, усиливают его неоднородность и, соответственно, снижают альбедо [6]. Как следствие, возможно более интенсивное весеннее таяние снега. Горючий материал на таких территориях высыхает быстрее, что повышает как СТВ [7], так и горимость лесов в мае — июне [8]. Нетрудно видеть причинно-следственную связь. Чем интенсивнее были пожары в предыдущем году, тем больше образовалось продуктов горения. Там, где они выпадали, весной быстрее повышалась СТВ. Это положительная обратная связь. Для некоторых локаций она может быть значимой, устойчивой, и это опасно в связи с увеличением не только КЛП и ППО, но и активизацией других последствий потепления местного климата.

В [5] установлено, что такая связь наиболее значима для Якутии и в меньшей степени для Красноярского края, однако недостаточно изучен вопрос о том, на территориях каких районов или улусов этих регионов она обладает этим свойством, а также устойчивостью. Указанный пробел в знаниях существенен, поскольку зоны ответственности многих противопожарных подразделений Якутии совпадают с такими территориями, а долгосрочные прогнозы СТВ для них, предлагаемые Гидрометцентром России, характеризуются (по оценкам их разработчиков) оправдываемостью 0,7–0,8 [9].

При разработке таких прогнозов учитываются многочисленные факторы изучаемых процессов, способные в тех или иных условиях являться значимыми и устойчивыми. Поэтому расширение перечня таких факторов и выявление упомянутых условий является одним из перспективных направлений повышения качества таких прогнозов [10].

Вместе с тем для такого фактора межгодовых вариаций СТВ, как изменение показателей горимости лесов Якутии, упомянутые условия не выявлены, что ограничивает возможности его учета при прогнозировании. Наибольший интерес их определение представляет для регионов, обладающих значительными лесными ресурсами, населению, экосистемам и экономике которых ландшафтные пожары ежегодно причиняют существенный ущерб [11].

В России крупнейшим из таких регионов является республика Саха (Якутия) [12], а его лесным ресурсам в XXI веке причиняется все больший ущерб, что подтверждают соответствующие зависимости КЛП и ППО от времени (рис. 1).

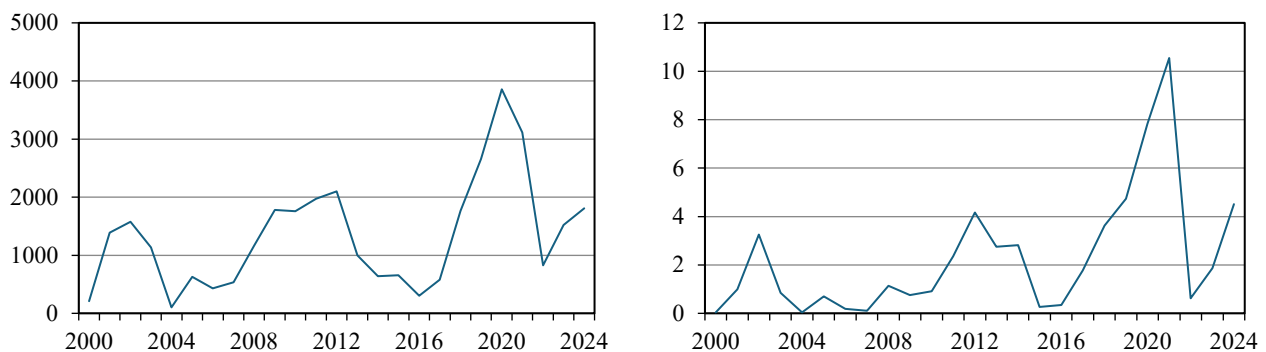


Рис. 1. Зависимости от времени показателей горимости ландшафтов Якутии, построенные авторами по данным дистанционного мониторинга²: а — КЛП; б — ППО

² Федеральное агентство лесного хозяйства. Информационная система дистанционного мониторинга. Блок мониторинга пожарной опасности. URL: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (дата обращения: 06.04.2026).

Как видно из рис. 1, изменения КЛП и ППО для Якутии происходят квазициклически, с периодом, близким к 11 годам. При этом в период 2000–2023 гг. в этих изменениях проявляются тенденции их активизации. Максимальные значения КЛП и ППО в XXI веке приходились на 2020 год и превышали минимальные значения этого показателя более чем в 10 и 100 раз [5]. Прогнозы этих показателей либо СТВ на предстоящий год, обладающие удовлетворительным качеством, необходимы для управления деятельностью противопожарных подразделений и ее планирования.

Следовательно, совершенствование методики их разработки представляет не только теоретический, но и практический интерес.

Согласно существующим представлениям о перспективных направлениях развития таких методик [13], одной из них является выявление факторов межгодовых изменений СТВ, способных оказывать значимое воздействие на колебания, запаздывающие на время, равное требуемой заблаговременности прогноза. Связи таких факторов с прогнозируемым процессом должны обладать устойчивостью к временным сдвигам сопоставляемых фрагментов их временных рядов [14]. Они должны обладать некоторой устойчивостью и к изменениям длины этих фрагментов³. Подобная устойчивость, имевшая место в прошлом, позволяет принять допущение о том, что выявленные связи останутся значимыми и в будущем [15].

В Якутии зоны ответственности большинства противопожарных подразделений практически совпадают с территориями ее улусов (районов). Поэтому для каждого из них необходимы прогнозы СТВ на предстоящий год, разработанные не для всей Якутии, а для таких территорий.

Вместе с тем улусы Якутии, для которых связи межгодовых изменений СТВ текущего года с вариациями показателей лесной горимости в предыдущем году являются значимыми и устойчивыми, ранее установлены не были, что препятствует учету упомянутых зависимостей при разработке реально востребованных пожарными прогнозов.

Изложенное позволяет выдвинуть гипотезу о том, что на территории Якутии существуют улусы (районы), для которых связи межгодовых изменений СТВ текущего года с вариациями показателей лесной горимости предыдущего года являются значимыми и обладают устойчивостью.

Несмотря на причинный характер изучаемой связи, из ее значимости для всей Якутии отнюдь не следует значимость и устойчивость также для любого отдельно взятого улуса. Поэтому выдвинутая гипотеза отнюдь не тривиальна.

Подтверждение справедливости гипотезы для каких-либо улусов Якутии позволило бы учесть рассматриваемые зависимости при составлении для них прогнозов СТВ и, следовательно, пожароопасности на предстоящий год. Тем не менее, проверка выдвинутой гипотезы ранее не проводилась.

Целью данной работы является выявление районов и улусов Якутии, для которых в отдельные месяцы гипотеза справедлива, а также оценка устойчивости изучаемых связей к временным сдвигам.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- выявление улусов (районов) Якутии, для которых в отдельные месяцы значимым фактором межгодовых изменений СТВ над их территориями являются вариации КЛП и ППО на всей территории республики в предшествующие годы;

- оценка устойчивости выявленных значимых связей к сдвигам исследуемых отрезков рядов СТВ и их предикторов по времени, а также к изменениям продолжительности этих отрезков.

Материалы и методы. При решении первой задачи принималось во внимание, что Республика Саха (Якутия) представляет собой наибольший по площади (3 083 523 км²) регион России, расположенный на севере Сибири. Климат Якутии — резко континентальный. Пожароопасный сезон охватывает период с мая по сентябрь. Пик горимости лесов на большей части территории республики приходится на июнь, тогда как в улусах, расположенных в северной ее части, — на июль.

В состав Якутии входит город республиканского значения (Якутск) и 34 улуса (района). На рис. 2 красным цветом выделен Якутск. Обозначены районы: 1 — Абыйский; 2 — Алданский; 3 — Аллаиховский; 4 — Амгинский; 6 — Булунский; 7 — Верхневиллоийский; 8 — Верхнеколымский; 9 — Верхоянский; 10 — Вилюйский; 14 — Ленский; 16 — Мирнинский; 17 — Момский; 19 — Нерюнгринский; 20 — Нижнеколымский; 21 — Нюрбинский; 23 — Оленёкский эвенкийский национальный; 24 — Олекминский; 26 — Сунтарский; 28 — Томпонский. Обозначены улусы: 5 — Анабарский национальный (Долгано-Эвенкийский); 11 — Горный; 12 — Жиганский; 13 — Кобяйский; 15 — Мегино-Кангаласский; 18 — Намский; 22 — Оймяконский; 25 — Среднеколымский; 27 — Таттинский; 29 — Усть-Алданский; 30 — Усть-Майский; 31 — Усть-Янский; 32 — Хангаласский; 33 — Чурапчинский; 34 — Эвено-Бытантайский национальный. Такие же числовые обозначения районов и улусов Якутии использованы в таблицах с результатами исследований.

³ Технологии динамико-статистических долгосрочных метеорологических прогнозов: современное состояние и перспективы. URL: <https://old.meteoinfo.ru/training/206-2011-02-20-07-18-08> (дата обращения: 20.02.2011).

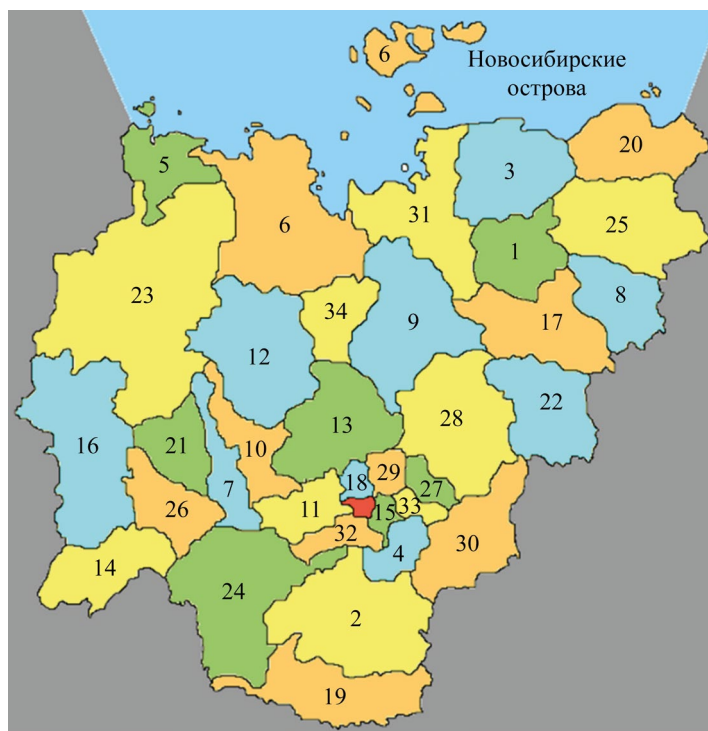


Рис. 2. Расположение улусов (районов) республики Саха (Якутия) [16]

Как фактический материал об изменениях СТВ в различных пунктах территории каждого улуса Якутии использована информация реанализа ERA5 об изменениях этого показателя на высоте 2 м над земной поверхностью [17]. Использованная информация описывает изменения СТВ для мая – июля с 2001 г. по 2024 г.⁴

Для каждого из 34 улусов (районов) Якутии с учетом информации об СТВ, соответствующей его пунктам, для которых в ERA5 представлены такие сведения, вычислены средние СТВ по всей его территории для месяцев с мая по июль.

Для выборочного тестирования результатов реанализа использованы сведения об изменениях в период 2010–2023 гг. СТВ в пунктах Якутск, Сангар, Алдан, Амга, Оймякон, Олѣкминск, Ленск, Вилуйск, Верхоянск и Черский⁵.

Установлено, что на любых отрезках времени продолжительностью 10–20 лет из периода 2000–2024 гг. значения коэффициента корреляции временных рядов, образованных из стационарных данных и рядов, сформированных из результатов ERA5, составляют не менее 0,99. Таким образом, тестирование подтвердило пригодность информации реанализа ERA5 для решения поставленных задач.

Как источник информации об изменениях КЛП и ППО в 2000–2023 гг. на территории Якутии, а также каждого ее улуса (района) использована Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства Лесного хозяйства.

Связи межгодовых изменений в 2001–2024 гг. СТВ над территорией того или иного улуса (района) Якутии для некоторого месяца, а также опережающих их на 1 год вариаций КЛП и ППО для всей ее территории изучались для различных отрезков времени длиной от 10 до 20 лет. При этом использован метод корреляционного анализа.

Перед осуществлением анализа в сопоставляемых рядах скомпенсированы линейные тренды. Для этого вычислялось откорректированное значение изучаемого показателя $X(k)$:

$$X(k) = X_0(k) - L \times (k - k_0).$$

Здесь k — год, соответствующий рассматриваемому члену изучаемого отрезка временного ряда процесса или его фактора, который может принимать значения от 2000 до 2024; k_0 — год, соответствующий первому члену рассматриваемого отрезка изучаемого временного ряда; $X_0(k)$ — член исходного временного ряда, соответствующий году k ; L — значение углового коэффициента линейного тренда, вычисленное методом наименьших квадратов по изучаемому отрезку рассматриваемого временного ряда.

Решение о значимости рассматриваемых связей принималось, если достоверность такого статистического вывода превышала 0,95. Как характеристика связи рассматривалось значение коэффициента корреляции.

⁴ ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=form> (дата обращения: 06.04.2026).

⁵ Global climate data tutiempo net climate data. URL: <https://www.google.com/search?q=tutiempo+net+climate+data&rlz> (дата обращения: 06.04.2026).

Принято допущение о том, что отклонения показателей изучаемых процессов от соответствующих трендов являются нормальными случайными процессами. Его справедливость подтверждалась с применением критерия Пирсона. Поэтому для оценки значимости вычисленного значения коэффициента корреляции применен критерий Стьюдента. Пороговый уровень этого коэффициента, при превышении которого принималось решение о значимости изучаемой связи, определялся по таблицам распределения Стьюдента, учитывая количество степеней свободы сопоставляемых временных рядов. Последнее определялось по их автокорреляционным функциям. Также по таблицам распределения Стьюдента определялись значения того же коэффициента, при превышении которых достоверность выводов о значимости связи составляла 0,9 и 0,99. Установлено, что количество степеней свободы изучаемых рядов равно их длине. Поэтому при длине 10 лет достоверность статистического вывода о значимости изучаемых связей составляет не менее 90 %, если соответствующее значение коэффициента корреляции превышает 0,52. Достоверность такого вывода не менее 95 %, если значение коэффициента корреляции рассматриваемых процессов превышает 0,635, а при его значении 0,745 достоверность этого вывода не ниже 99 %.

При длине рядов 20 лет достоверности вывода о значимости изучаемых связей 90 % соответствует пороговый уровень коэффициента корреляции 0,36, а достоверностям того же вывода 95 % и 99 % отвечают пороговые уровни этого коэффициента 0,45 и 0,58 соответственно.

При решении второй задачи оценивалась устойчивость выявленных значимых связей межгодовых изменений СТВ с вариациями КЛП и ППО к сдвигам по времени рассматриваемых отрезков изучаемых временных рядов, а также к изменениям их длины. Рассматривались сдвиги по времени на единицы лет, как в прошлое, так и в будущее. Предполагалось, что значения длины изучаемых временных рядов могут лежать в пределах от 10 до 20 лет.

Для оценки устойчивости изучаемых связей сопоставлялись значения коэффициента корреляции временных рядов СТВ, с рядами КЛП или ППО для каждого улуса (района) Якутии, соответствующие изучаемым отрезкам времени, которые отличались годом своего начала, а также длиной. При этом учитывались значения пороговых уровней коэффициента корреляции, соответствующие рассматриваемой достоверности выводов об их значимости, а также количеству степеней свободы изучаемых рядов.

Связи между изучаемыми процессами признавались устойчивыми к рассматриваемым временным сдвигам, если для всех изучаемых отрезков они являлись значимыми с достоверностью не ниже 95 %.

Эти связи рассматривались как устойчивые к вариациям продолжительности изучаемых отрезков, если при любом ее значении в пределах от 10 до 20 лет они являлись значимыми с достоверностью не ниже 95 %.

Результаты исследования. При решении первой задачи установлено, что статистические связи межгодовых изменений средних СТВ над территориями некоторых улусов Якутии на отрезках времени 10–20 лет с вариациями показателей горимости ее лесов, опережающими их по времени на 1 год, в период 2000–2023 гг., были значимы лишь для месяцев май — июль.

Как пример, в таблице 1 приведены значения коэффициента корреляции межгодовых изменений средних СТВ над территориями улусов (районов) Якутии для периода 2012–2021 гг. с вариациями ППО в 2011–2020 гг. Здесь и далее желтым цветом выделены значения этих коэффициентов, для которых достоверность выводов об их значимости превышает 90 %, зеленым — 95 %, голубым — 99 %.

Таблица 1

Значения коэффициента корреляции межгодовых изменений СТВ над территориями улусов (районов) Якутии для периода 2012–2021 гг. с вариациями ППО в 2011–2020 гг.

№ улуса (района)	Май	Июнь	Июль	№ улуса (района)	Май	Июнь	Июль	№ улуса (района)	Май	Июнь	Июль
1	0,661	0,626	0,556	13	0,599	0,462	0,572	25	0,410	0,567	0,409
2	0,028	0,318	0,264	14	0,452	0,243	0,553	26	0,578	0,440	0,626
3	0,673	0,680	0,580	15	0,499	0,606	0,503	27	0,504	0,576	0,564
4	0,206	0,505	0,280	16	0,654	0,217	0,544	28	0,459	0,649	0,559
5	0,669	0,185	0,638	17	0,528	0,652	0,438	29	0,492	0,577	0,616
6	0,610	0,381	0,695	18	0,028	0,318	0,264	30	0,213	0,557	0,274
7	0,590	0,490	0,616	19	0,165	0,455	0,297	31	0,728	0,535	0,568
8	0,414	0,500	0,500	20	0,778	0,553	0,586	32	0,302	0,488	0,478
9	0,694	0,609	0,673	21	0,616	0,468	0,662	33	0,475	0,554	0,530
10	0,575	0,518	0,629	22	0,304	0,570	0,373	34	0,745	0,585	0,702
11	0,458	0,469	0,536	23	0,468	0,446	0,520	Якутск	0,494	0,595	0,511
12	0,597	0,469	0,719	24	0,722	0,329	0,572	Вся Якутия	0,628	0,545	0,683

Как следует из таблицы 1, вывод о значимости связей межгодовых изменений СТВ для мая в период 2012–2021 гг. с вариациями ППО, опережающими их по времени на 1 год, характеризуется достоверностью не ниже 99 % для Нижнеколымского района и Эвено-Бытантайского национального улуса. Достоверность такого вывода превышала 95 % для Абыйского, Аллаиховского, Булунского, Верхоянского, Мирненского, Олёкминского районов, а также Анабарского национального (Долгано-Эвенкийского) улуса. Как видим из рис. 2, рассматриваемые связи с указанной достоверностью могут быть признаны значимыми для районов и улусов Якутии, расположенных в ее северной и западной части.

Для июня такой же вывод справедлив с достоверностью не ниже 95 % для Аллаиховского, Момского и Томпонского районов. Для июля он адекватен с такой же достоверностью для Булунского, Верхоянского, Нюрбинского районов, а также Анабарского национального (Долгано-Эвенкийский), Эвено-Бытантайского национального и Жиганского улусов. Для всей Якутии рассматриваемый вывод справедлив с достоверностью не ниже 90 % для мая и июня и 95 % для июля.

В таблице 2 приведены значения коэффициента корреляции межгодовых изменений СТВ над территориями улусов (районов) Якутии для периода 2012–2021 гг. с вариациями КЛП для периода 2011–2020 гг.

Таблица 2

Значения коэффициента корреляции межгодовых изменений СТВ над территориями улусов (районов) Якутии для периода 2012–2021 гг., с вариациями КЛП для периода 2011–2020 гг.

№ улуса (района)	Май	Июнь	Июль	№ улуса (района)	Май	Июнь	Июль	№ улуса (района)	Май	Июнь	Июль
1	0,859	0,675	0,393	13	0,734	0,630	0,516	25	0,723	0,659	0,164
2	0,069	0,450	0,226	14	0,352	0,243	0,433	26	0,520	0,479	0,491
3	0,872	0,744	0,525	15	0,600	0,804	0,533	27	0,608	0,797	0,536
4	0,325	0,694	0,310	16	0,605	0,239	0,420	28	0,601	0,875	0,552
5	0,757	0,297	0,731	17	0,746	0,799	0,303	29	0,579	0,791	0,613
6	0,748	0,507	0,749	18	0,069	0,450	0,226	30	0,348	0,687	0,318
7	0,568	0,593	0,507	19	0,071	0,463	0,313	31	0,835	0,653	0,511
8	0,716	0,591	0,188	20	0,897	0,596	0,544	32	0,332	0,679	0,426
9	0,760	0,703	0,583	21	0,607	0,512	0,565	33	0,584	0,773	0,572
10	0,542	0,654	0,545	22	0,557	0,763	0,349	34	0,818	0,706	0,592
11	0,489	0,673	0,517	23	0,326	0,490	0,381	Якутск	0,593	0,794	0,531
12	0,701	0,603	0,680	24	0,724	0,383	0,567	Вся Якутия	0,736	0,790	0,611

Из таблицы 2 следует, что вывод о значимости связей межгодовых изменений средних СТВ в 2012–2021 гг. для мая с вариациями КЛП за 2011–2020 гг. характеризуется достоверностью не ниже 0,99 для Абыйского, Аллаиховского, Булунского, Верхоянского, Момского, Нижнеколымского Усть-Янского районов и Анабарского национального (Долгано-Эвенкийского), Эвено-Бытантайского национального, а также Кобяйского улусов.

Для июня указанный вывод с той же достоверностью справедлив для Момского, Томпонского района, Мегино-Кангаласского, Таттинского, Усть-Алданского Чурапчинский улуса, а также города Якутск.

Для июля он столь же адекватен лишь для Булунского района.

На всей территории Якутии рассматриваемый вывод справедлив с достоверностью: для мая — не ниже 95 %; для июня — не ниже 99 %; для июля — не ниже 90 %.

Из сравнения таблицы 1 и таблицы 2 понятно, что районы и улусы Якутии, для которых связи межгодовых изменений средних СТВ с вариациями ППО и КЛП значимы, во многом совпадают, но достоверность выводов о значимости связей средних СТВ и КЛП (как для отдельных районов, так и Якутии в целом) заметно выше.

Аналогичные закономерности проявляются и в распределении по территории Якутии характеристик рассматриваемых связей для других изучаемых отрезков времени. При этом достоверность выводов о значимости связей средних СТВ и КЛП выше, чем аналогичная характеристика связей средних СТВ и ППО, не при любых значениях продолжительности изучаемых отрезков рассматриваемых временных рядов.

При решении второй задачи установлено, что выявленные для периода 2012–2021 гг. значимые статистические связи межгодовых изменений средних СТВ для месяцев с мая по июль, а также ППО или КЛП, опережающих их по времени на 1 год, сохраняют свою значимость и для многих других отрезков времени такой же длительности.

Как пример, в таблице 3 приведены значения коэффициента корреляции межгодовых изменений средних СТВ, соответствующих июню для отрезков времени 2011–2020 гг., 2012–2021 гг., 2013–2022 гг., 2014–2023 гг., с вариациями ППО, опережающими их по времени на 1 год.

Значения коэффициента корреляции межгодовых изменений средних СТВ, соответствующих июню, для различных улусов и районов Якутии, а также разных отрезков времени продолжительностью 10 лет с вариациями ППО, опережающими их на 1 год

№ улуса (района)	Период				№ улуса (района)	Период			
	2011–2020	2012–2021	2013–2022	2014–2023		2011–2020	2012–2021	2013–2022	2014–2023
1	0,583	0,626	0,625	0,719	19	0,419	0,455	0,494	0,500
2	0,139	0,318	0,415	0,425	20	0,546	0,553	0,554	0,630
3	0,615	0,680	0,679	0,723	21	0,454	0,468	0,465	0,463
4	0,272	0,505	0,651	0,663	22	0,449	0,570	0,619	0,613
5	0,320	0,185	0,186	0,263	23	0,063	0,446	0,442	0,456
6	0,362	0,381	0,381	0,489	24	0,442	0,329	0,324	0,406
7	0,363	0,490	0,487	0,481	25	0,425	0,567	0,564	0,638
8	0,509	0,500	0,514	0,584	26	0,109	0,440	0,436	0,431
9	0,612	0,609	0,606	0,648	27	0,412	0,576	0,687	0,704
10	0,437	0,518	0,520	0,513	28	0,495	0,649	0,732	0,741
11	0,273	0,469	0,492	0,483	29	0,429	0,577	0,620	0,633
12	0,451	0,469	0,476	0,511	30	0,374	0,557	0,882	0,880
13	0,588	0,462	0,597	0,603	31	0,552	0,557	0,588	0,640
14	–0,129*	0,243	0,235	0,250	32	0,225	0,488	0,533	0,535
15	0,430	0,606	0,662	0,675	33	0,416	0,554	0,654	0,671
16	–0,008*	0,217	0,208	0,221	34	0,544	0,585	0,589	0,654
17	0,609	0,652	0,655	0,701	Якутск	0,412	0,595	0,649	0,661
18	0,146	0,318	0,406	0,414	Вся Якутия	0,485	0,645	0,683	0,707

Примечание: * Пределы значения коэффициента корреляции — от –1 до +1. Из таблицы видно, что отрицательные показатели незначимы (близки к нулю), а потому могут быть результатом действия неучтенных случайных факторов. Это же относится к малым положительным коэффициентам.

Таблица 3 показывает, что значения коэффициента корреляции межгодовых изменений средних СТВ, соответствующих июню, с вариациями ППО, опережающими их по времени на 1 год, для отрезков времени 2013–2022 гг., 2014–2023 гг. превышают порог значимости, соответствующий достоверности 0,9, для всех районов и улусов Якутии, где такое имело место для периода 2012–2021 гг.

Для отрезка времени 2011–2020 гг. аналогичный вывод справедлив лишь для Абыйского, Аллаиховского, Верхоянского, Момского, Нижнеколымского районов, а также Усть-Янского, Кобяйского и Эвено-Бытантайского национального улуса. Из этого следует, что в современном периоде устойчивость выявленных связей с течением времени увеличивается. Как нетрудно заметить, при этом происходит и усиление этих связей.

Для периода 2011–2020 гг. улусов или районов Якутии, для которых достоверность вывода об их значимости для июня превышала 90 %, обнаружено всего восемь. При этом уровень 0,95 или 0,99 его достоверность где-либо не достигала.

Для периода 2012–2021 гг. таких районов выявлено 16, а районов, где достоверность того же вывода превосходила 95 %, обнаружено три. Уровень 99 % значения этого показателя также нигде не достигают.

Для периода 2013–2022 гг. районов, где достоверность того же вывода превосходила 90 %, выявлено 19. Уровень достоверности, равный 95 %, превышен в девяти районах. Для Усть-Майского улуса достоверность вывода о значимости изучаемых связей превышает 99 %.

Для периода 2014–2023 гг. достоверность рассматриваемого вывода превышает 90 % для 20 районов. Ее уровень, равный 95 %, превышает в 13 районах, а уровень 99 % — в двух (в Усть-Майском улусе и Томпонском районе).

Значения коэффициента корреляции межгодовых изменений средних СТВ, соответствующих июню, для отрезков времени 2011–2020 гг., 2012–2021 гг., 2013–2022 гг., 2014–2023 гг., с вариациями КЛП, опережающими их по времени на 1 год, представлены в таблице 4.

Таблица 4

Значения коэффициента корреляции межгодовых изменений средних СТВ над улусами (районами) Якутии, для разных отрезков времени длиной 10 лет с вариациями КЛП на ее территории, опережающими их по времени на 1 год

№ улуса (района)	Период				№ улуса (района)	Период			
	2011–2020	2012–2021	2013–2022	2014–2023		2011–2020	2012–2021	2013–2022	2014–2023
1	0,617	0,675	0,715	0,830	19	0,427	0,463	0,450	0,458
2	0,340	0,450	0,456	0,470	20	0,549	0,596	0,647	0,742
3	0,721	0,744	0,777	0,841	21	0,480	0,512	0,560	0,559
4	0,494	0,694	0,756	0,774	22	0,652	0,763	0,767	0,764
5	0,327	0,297	0,298	0,401	23	0,445	0,490	0,510	0,530
6	0,409	0,507	0,513	0,653	24	0,267	0,383	0,404	0,508
7	0,341	0,593	0,614	0,611	25	0,629	0,659	0,682	0,776
8	0,588	0,591	0,629	0,718	26	0,467	0,479	0,519	0,514
9	0,619	0,703	0,731	0,786	27	0,543	0,797	0,842	0,867
10	0,635	0,654	0,658	0,654	28	0,626	0,875	0,903	0,918
11	0,569	0,673	0,667	0,662	29	0,662	0,791	0,794	0,814
12	0,608	0,603	0,623	0,672	30	0,590	0,687	0,876	0,873
13	0,694	0,630	0,785	0,796	31	0,488	0,593	0,657	0,762
14	–0,081*	0,243	0,317	0,337	32	0,464	0,679	0,679	0,684
15	0,598	0,804	0,813	0,832	33	0,555	0,773	0,809	0,835
16	–0,050*	0,239	0,327	0,345	34	0,558	0,706	0,738	0,822
17	0,655	0,799	0,802	0,863	Якутск	0,584	0,794	0,801	0,820
18	0,353	0,450	0,452	0,465	Вся Якутия	0,692	0,790	0,763	0,792

Примечание: * Пределы значения коэффициента корреляции — от –1 до +1. Из таблицы видно, что отрицательные показатели незначимы (близки к нулю), а потому могут быть результатом действия неучтенных случайных факторов. Это же относится к малым положительным коэффициентам.

Таблица 4 свидетельствует о том, что значения коэффициента корреляции межгодовых изменений средних СТВ, соответствующих июню, с вариациями КЛП, опережающими их по времени на 1 год, для отрезков времени 2013–2022 гг., 2014–2023 гг. также превосходят порог значимости, соответствующий достоверности 90 %, для всех районов или улусов Якутии, где такое имело место для периода 2012–2021 гг. Для всех рассматриваемых отрезков времени этот порог ими превышает для 19 улусов или районов Якутии (из 35 возможных, включая город Якутск).

Из этого следует, что устойчивость выявленных связей СТВ — КЛП к изменениям даты начала сопоставляемых отрезков изучаемых временных рядов длиной 10 лет выше, чем связей СТВ — ППО. При этом она с течением времени также повышается. Увеличивается количество районов, где достоверности вывода об их значимости превосходит 99 %.

Для периода 2011–2020 гг. таких районов не выявлено. Для периода 2012–2021 гг. их восемь, для отрезка времени 2013–2022 их 12, а для периода 2014–2023 гг. — 16.

Аналогичные особенности соответствуют рассматриваемым связям также для мая и июля.

Также при решении второй задачи определены улусы (районы) Якутии, для которых достоверность вывода о значимости коэффициента корреляции временных рядов средних СТВ для различных месяцев, а также рядов КЛП и ППО, опережающих их по времени на 1 год, составляла 95 % и 99 %, при условии, что они содержат от 10 до 20 членов.

Как пример, в таблице 5 представлены значения коэффициентов корреляции временных рядов средних СТВ над территориями различных улусов и районов Якутии для июня, соответствующих периодам 2001–2021 гг. и 2012–2021 гг., а также рядов КЛП и ППО для отрезков времени 2000–2020 гг. и 2011–2020 гг.

Значения коэффициентов корреляции рядов средних СТВ над территориями различных улусов и районов Якутии для июня, соответствующих периодам 2001–2021 гг. и 2012–2021 гг., а также рядов КЛП и ППО для отрезков времени 2000–2020 гг. и 2011–2020 гг.

СТВ — КЛП						СТВ — ППО					
№ улуса (района)	2001–2021	2012–2021	№ улуса (района)	2001–2021	2012–2021	№ улуса (района)	2001–2021	2012–2021	№ улуса (района)	2001–2021	2012–2021
1	0,521	0,675	19	0,115	0,463	1	0,657	0,626	19	0,142	0,455
2	0,131	0,450	20	0,515	0,596	2	0,139	0,318	20	0,617	0,553
3	0,597	0,744	21	0,327	0,512	3	0,643	0,680	21	0,525	0,468
4	0,302	0,694	22	0,341	0,763	4	0,312	0,505	22	0,396	0,570
5	0,276	0,297	23	0,197	0,490	5	0,399	0,185	23	0,218	0,446
6	0,451	0,507	24	0,222	0,383	6	0,517	0,381	24	0,467	0,329
7	0,340	0,593	25	0,559	0,659	7	0,493	0,490	25	0,525	0,567
8	0,559	0,591	26	0,255	0,479	8	0,598	0,500	26	0,384	0,440
9	0,461	0,703	27	0,324	0,797	9	0,584	0,609	27	0,382	0,576
10	0,341	0,654	28	0,322	0,875	10	0,486	0,518	28	0,394	0,649
11	0,336	0,673	29	0,379	0,791	11	0,364	0,469	29	0,451	0,577
12	0,358	0,603	30	0,276	0,687	12	0,515	0,469	30	0,304	0,557
13	0,484	0,630	31	0,518	0,606	13	0,560	0,462	31	0,627	0,513
14	0,053	0,243	32	0,339	0,679	14	0,199	0,243	32	0,348	0,488
15	0,464	0,804	33	0,340	0,773	15	0,460	0,606	33	0,389	0,554
16	0,214	0,239	34	0,453	0,706	16	0,428	0,217	34	0,573	0,585
17	0,530	0,799	Якутск	0,414	0,794	17	0,643	0,652	Якутск	0,454	0,595
18	0,127	0,450	Вся Якутия	0,457	0,790	18	0,131	0,318	Вся Якутия	0,566	0,645

Таблица 5 позволяет заключить, что для многих улусов и районов Якутии изучаемые связи для июня с достоверностью не ниже 95 % являются значимыми при значениях длины отрезков временных рядов, используемых для их изучения, равных как 10 лет, так и 20 лет.

Аналогичные выводы справедливы и для прочих значений длины изучаемых рядов из диапазона 10–20 лет, а также для месяцев май и июнь.

Как видим, результаты, полученные при решении второй задачи, позволяют утверждать, что выявленные значимые связи межгодовых изменений средних СТВ над улусами и районами Якутии с опережающими их по времени на 1 год вариациями КЛП и ППО обладают устойчивостью как к сдвигам этих рядов по времени, так и к изменениям их длины.

Обсуждение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что нашла подтверждение выдвинутая гипотеза о существовании улусов (районов) Якутии, для которых связи межгодовых изменений средних СТВ для мая — июля текущего года с вариациями показателей горимости лесов на всей ее территории для предыдущего года являются значимыми и устойчивыми. Вместе с тем эти результаты нуждаются в содержательной интерпретации, сопоставлении с имеющимися научными данными и критическом анализе.

Прежде всего, обратим внимание на пространственное распределение улусов (районов) Якутии, для которых выдвинутая гипотеза подтвердилась. Как видно из таблиц 1 и 2, для мая наибольшие значения коэффициента корреляции межгодовых изменений средних СТВ с опережающими вариациями КЛП и ППО характерны для районов и улусов Якутии, которые расположены в северной и западной части ее территории. К таким районам относятся Абыйский, Аллаиховский, Булунский, Верхоянский, Нижнеколымский, и Усть-Янский. Соответствующими улусами являются Анабарский национальный и Эвено-Бытантайский национальный.

Для июня значимые связи характерны также для центральной и восточной Якутии (Аллаиховского, Момского и Томпонского районов).

Для июля выявленные связи значимы для Булунского, Верхоянского, Нюрбинского районов, а также Анабарского национального, Эвено-Бытантайского национального и Жиганского улусов (север Якутии).

Такое пространственное распределение представляется физически обоснованным. Северные районы Якутии, ландшафты которых представляют собой тундру и лесотундру, характеризуются более поздним началом таяния их снежного покрова. Поэтому механизм положительной обратной связи, описанный во введении, действует на их территориях дольше (с мая до июля).

В центральных районах Якутии, территории которых покрыты тайгой, снежный покров к июню уже в значительной мере сошел. В этом месяце происходит испарение влаги из горючего материала и транспирация в фитоценозах, где начинается вегетационный период. Эти процессы оказывают тем более интенсивное охлаждающее влияние на приземный слой атмосферы, чем больше влаги в горючем материале и доступно растениям. Так как к июлю горючий материал высыхает, интенсивность испарения из него влаги снижается, рассматриваемый механизм на таких территориях действует преимущественно в июне.

Для ряда районов и улусов, расположенных в южной и центральной части территории Якутии (Алданский, Нерюнгринский районы, Намский улус) значимых связей между изучаемыми процессами для какого-либо месяца не выявлено. Это может объясняться тем, что в южных районах в мае высыхание горючего материала уже завершено, вследствие чего ускорение таяния их снежного покрова, завершающееся к апрелю, на соответствующие им изменения средних СТВ как-либо влиять не может. Кроме того, характеристики ландшафтных комплексов южных районов Якутии являются существенно иными в сравнении с аналогичными характеристиками для районов центральной части ее территории, относящихся к зоне бореальных лесов. Здесь встречаются не только хвойные, но и широколиственные леса, а также лесостепи, где таяние снежного покрова и высыхание горючего материала происходит раньше. Вследствие чего на изменения средних СТВ над их территориями более существенным может являться влияние циркуляционных и иных климатических факторов, маскирующих изучаемый эффект.

Описанный в [7] физический механизм подтвердил выводы [8] о существенном влиянии осаждения продуктов горения на альбедо и скорость таяния снежного покрова. Нашли подтверждение представления [5] о механизме переноса сажи и аэрозолей от лесных пожаров в высоких широтах Сибири. Подтверждены выводы о роли ветров южных румбов, преобладающих здесь в осенне-зимние месяцы благодаря Сибирскому антициклону.

Заслуживает внимания установленный факт, состоящий в том, что достоверность выводов о значимости связей изменений средних СТВ с вариациями КЛП в целом заметно выше, чем аналогичная характеристика связей этих изменений с вариациями ППО. Это можно объяснить тем, что значение КЛП на территории любого района (улуса) в меньшей степени определяется случайными экстремальными событиями, нежели соответствующее значение ППО.

К таким событиям, влияющим как на КЛП, так и на ППО, относятся как природные явления (например, сухие грозы), так и последствия деятельности человека (непредумышленные и умышленные поджоги). На чувствительность изменений ППО к таким событиям влияет также режим контроля лесопожарной обстановки на участке территории, где возник пожар.

Если на таком участке контроль этой обстановки осуществляется всеми существующими, в том числе наземными средствами (в основном лесниками), ликвидация пожара на нем происходит, как правило, оперативно, а значения ППО невелики.

Пожар продолжается значительно дольше (вследствие чего больше и ППО) на участках, где мониторинг лесопожарной обстановки осуществляется только авиационными или космическими средствами. Такие участки обычно удалены от населенных пунктов и мест дислокации противопожарных подразделений, вследствие чего силы и средства, необходимые для ликвидации пожара, на них надо вначале доставить. Последнее может потребовать немало времени.

Пожар развивается без каких-либо ограничений по времени (пока его не погасит дождь) на участках, где лесопожарная обстановка контролируется космическими средствами, но ликвидация пожаров признается нецелесообразной. Такие участки на малонаселенной территории Якутии преобладают.

Повышение средних СТВ для упомянутых участков, как правило, приводит к существенному увеличению ППО. КЛП при этом также повышается, но менее значимо (сухие грозы возникают чаще). Один аномально крупный пожар на таких участках может существенно увеличить ППО в соответствующем улусе (районе), в то время к значению КЛП он добавляет всего лишь единицу.

К существенным результатам данной работы относится установленное усиление изучаемых связей в период 2000–2024 гг. Как следует из таблиц 3 и 4, при переходе от более ранних изучаемых отрезков к более поздним количество улусов, для которых достоверность вывода о значимости рассматриваемых связей превышает заданные пороговые уровни, возрастает. Так, для связей изменений средних СТВ в июне с вариациями КЛП количество районов, где достоверность превышает 99 %, увеличивается от нуля (для 2011–2020 гг.), до 16 (для 2014–2023 гг.).

Этот факт представляется весьма важным и допускает следующую интерпретацию. В условиях продолжающегося потепления климата интенсивность пожаров в Якутии возрастает (что видно из рис. 1), следовательно, увеличивается и количество образующихся продуктов горения. Последнее приводит к усилению механизма положительной обратной связи между горимостью лесов всей Якутии для предыдущего года, а также средними СТВ, а значит, и горимостью лесов рассматриваемого ее улуса (района) для текущего года. Иными словами, обнаруженное усиление статистических связей может отражать реальное усиление соответствующего физического механизма в условиях потепления климата, что согласуется с представлениями об активизации положительных обратных связей в климатической системе.

Выявленные свойства связей между изучаемыми процессами позволяют предположить, что их учет при разработке долгосрочных прогнозов средних СТВ и лесопожарной обстановки на территориях выявленных улусов (районов) Якутии способен повысить оправдываемость таких прогнозов.

Вместе с тем необходимо отметить, что применяемая методика исследования основана на ряде упрощающих допущений, корректная проверка которых не может быть осуществлена вследствие особенностей применяемого фактического материала. Наиболее существенным является допущение о нормальности распределения отклонений изучаемых показателей от соответствующих трендов. Справедливость такого допущения не может быть надежно проверена вследствие малой длины изучаемых временных рядов.

Хотя такая проверка с применением критерия Пирсона не выявила противоречий с этим предположением, мощность данного критерия при столь коротких выборках (10–20 членов) невелика. Вследствие этого отличия фактических законов распределения рассматриваемых величин от нормального закона (проявляющиеся на их хвостах) могли быть не выявлены. Следовательно, полученные результаты целесообразно рассматривать как носящие качественный характер.

Необходимо отметить также, что относительно небольшая длина изучаемых отрезков временных рядов ограничивает возможности их корреляционного анализа. В результате этого некоторые реально существующие, но умеренные по силе, связи могли оказаться не выявлены.

Следует отметить, что в работе рассматривались связи изменений средних СТВ для того или иного месяца над территориями отдельных улусов (районов) Якутии с опережающими их на 1 год вариациями показателей горимости ландшафтов на всей территории Якутии за весь пожароопасный сезон. Такой подход обоснован физическим механизмом изучаемого явления.

Продукты горения, образовавшиеся при пожаре в любом месяце и на любом участке территории Якутии, к началу периода формирования в изучаемом районе (улусе) снежного покрова (осень) могут быть доставлены в него ветром и участвовать в его загрязнении. Тем не менее, возможно, что исследование связей межгодовых изменений средних СТВ над каждым улусом (районом) Якутии с вариациями показателей горимости в определенных зонах территории Якутии могло бы уточнить полученные результаты и повысить их прогностическую ценность.

Несомненный интерес представляет также изучение влияния на изменения средних СТВ тех или иных улусов (районов) Якутии изменений состояния и видового состава фитоценозов на местностях, где произошли ландшафтные пожары, а также других факторов, способных влиять на вариации альбедо их снежного покрова в весенние и летние месяцы.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что изменения лесопожарной обстановки на территориях некоторых улусов Якутии регулируются положительной обратной связью, которая при потеплении климата усиливается. Поскольку последнее может представлять существенную опасность для населения, экосистем и экономики, актуальным является ускоренное и адекватное развитие сил и средств соответствующих противопожарных подразделений Якутии.

Заключение. Таким образом, справедливость выдвинутой гипотезы подтверждена. Доказано, что значимыми факторами межгодовых изменений средних по соответствующим территориям среднемесячных температур воздуха в приземном слое атмосферы над многими улусами и районами республики Саха (Якутия), на отрезках времени от 10 до 20 лет являются вариации показателей горимости лесов на всей ее территории, опережающие их по времени на 1 год. Достоверность выводов об их значимости для многих таких территорий превышает 95 %, а для некоторых и 99 %.

Установлено, что указанные связи являются значимыми лишь для месяцев с мая по июль, что соответствует физическому механизму влияния продуктов горения на альбедо снежного покрова и, как следствие, на температурный режим в период весеннего снеготаяния.

Выявлены улусы и районы Якутии, для которых связи межгодовых изменений средних по их территориям среднемесячных температур воздуха, с опережающими на 1 год вариациями показателей горимости их лесов значимы с достоверностью не ниже 95 %.

Для мая это преимущественно северная и западная части территории республики (Абыйский, Аллаиховский, Булунский, Верхоянский, Нижнеколымский, Усть-Янский районы, Анабарский национальный и Эвено-Бытантайский национальный улусы и ряд других). Для июня значимые связи выявлены также для центральных и восточных районов (Момский, Томпонский районы, Мегино-Кангаласский, Таттинский, Чурапчинский улусы и др.). Для июля — для Булунского, Верхоянского, Нюрбинского районов, Анабарского национального, Эвено-Бытантайского национального и Жиганского улусов.

Связи изучаемых процессов с указанными факторами в современном периоде обладают устойчивостью к сдвигам годов, соответствующих началам сопоставляемых отрезков изучаемого процесса и его факторов в прошлое и будущее на единицы лет, а также к изменениям их продолжительности в пределах 10–20 лет. При этом в период 2000–2024 гг. связи изучаемых процессов и их факторов для выявленных улусов усиливаются (с течением времени возрастают как значения коэффициентов корреляции, характеризующих изучаемые связи, так и количество улусов, для которых эти связи являются значимыми).

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности разработки для выявленных улусов (районов) республики Саха (Якутия) прогнозов на предстоящий год средних по их территориям среднемесячных температур воздуха для весенних и летних месяцев, а также пожароопасности по метеоусловиям. Учитывая это, к перспективным направлениям дальнейших исследований относятся:

- разработка для выявленных улусов Якутии прогнозов на предстоящий год межгодовых изменений температурного режима и пожарных рисков, а также исследование их свойств;
- выявление районов других субъектов Российской Федерации, для которых изученные связи обладают близкими свойствами и также могут быть использованы при прогнозировании для них пожарной опасности.

Список литературы / References

1. Валендик Э.Н., Кисилыхов Е.К., Рыжкова В.А., Пономарев Е.И., Данилова И.В. Ландшафтные пожары тайги Центральной Сибири. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2014;(3):73–86. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-3-73-86>
- Valendik EN, Kisilyakhov YeK, Ryzhkova VA, Ponomarev EI, Danilova IV. Landscape Wildfires Nature in Central Siberian Taiga. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2014;(3):73–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-3-73-86>
2. Ponomarev EI, Kharuk VI, Renson KJ. Wildfires in Siberia: Trends and Climatic Drivers. *Environmental Research Letters*. 2016; 07(06):125. URL: <https://www.mdpi.com/1999-4907/7/6/125> (accessed 15.04.2026).
3. Buryak LV, Kukavskaya EA, Ivanov VA, Malykh OF, Kotelnikov RV. Assessment of Fire Hazard and Its Dynamics in Forest Areas of Siberia. *Contemporary Problems of Ecology*. 2021;14:803–814. <https://doi.org/10.1134/S1995425521070040>
4. Petrov IA, Shushpanov AS, Golyukov AS, Dvinskaya ML, Kharuk VI. Wildfire Dynamics in Pine Forests of Central Siberia in a Changing Climate. *Contemporary Problems of Ecology*. 2023;16:36–46. <https://doi.org/10.1134/S1995425523010067>
5. Холопцев А.В., Шубкин Р.Г., Сергеев И.Ю., Батуру А.Н., Проскова Н.Ю. *Физические основы теории долгосрочного и сверхдолгосрочного прогнозирования рисков возникновения ландшафтных пожаров*. Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России; 2024. 337 с. URL: <https://profspo.ru/books/140586> (дата обращения: 16.06.2025).
- Kholoptsev AV, Shubkin RG, Sergeev IYu, Baturu AN, Proskova NYu. *The Physical Foundations of the Theory of Long-Term and Ultra-Long-Term Forecasting of Risks of Landscape Fires*. Zheleznogorsk: Siberian Fire and Rescue Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia; 2024. 337 p. (In Russ.) URL: <https://profspo.ru/books/140586> (accessed: 16.06.2025).
6. Шубкин Р.Г. Результаты долгосрочного прогнозирования крупномасштабных лесных пожаров в Байкальском регионе. *Сибирский пожарно-спасательный вестник*. 2016;3:35–38.
- Shubkin RG, Shirinkin PV. Long-Term Forecasting Results of Large-Scale Forest Fires in the Baikal Region. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2016;3:35–38. (In Russ.)
7. Будыко М.И. *Климат в прошлом и будущем*. Ленинград: Гидрометеиздат; 1980. 352 с.
- Budyko MI. *Climate in the Past and the Future*. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1980. 352 p. (In Russ.)
8. Нестеров В.Г. *Горимость леса и методы ее определения*. Москва: Гослесбумиздат; 1949. 76 с.
- Nesterov VG. *Forest Burnability and Methods of its Determination*. Moscow: Goslesbumizdat; 1949. 76 p. (In Russ.)
9. Филатов А.Н., Муравьев А.В., Реснянский Ю.Д. Долгосрочный метеорологический прогноз: математические проблемы и возможности гидродинамических моделей. В кн.: *70 лет Гидрометцентру России*. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат; 1999. С. 141–165.
- Filatov AN, Muravyov AV, Resnyansky YuD. Long-Term Meteorological Forecast: Mathematical Problems and Possibilities of Hydrodynamic Models. In book: *70 Years of the Hydrometeorological Center of Russia*. St. Petersburg: Hydrometeoizdat; 1999. P. 141–165. (In Russ.)
10. Вильфанд Р.М., Зарипов Р.Б., Киктев Д.Б., Круглова Е.Н., Крыжов В.Н., Куликова И.А. и др. Долгосрочные метеорологические прогнозы в Гидрометцентре России. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2019;4(374):12–36.
- Vilfand RM, Zaripov RB, Kiktev DB, Kruglova EN, Kryjov VN, Kulikova IA, et al. Long-Range Forecasting at Hydrometeorological Center of Russia. *Hydrometeorological Research and Forecasting*. 2019;4(374):12–36. (In Russ.)
11. Шешуков М.А., Ковалев А.П., Орлов А.М., Позднякова В.В. Проблемы и перспективы охраны лесов от пожаров. *Сибирский лесной журнал*. 2020;2:14–20. <https://doi.org/10.15372/SJFS20200202>
- Sheshukov MA, Kovalev AP, Orlov AM, Pozdnyakova VV. Problems and Prospects of Protecting Forests from Fires. *Siberian Journal of Forest Science*. 2020;2:14–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/SJFS20200202>

12. Волокитина А.В., Софронов М.А., Корец М.А., Софронова Т.М., Михайлова И.А. *Прогноз поведения лесных пожаров*. Красноярск: СО РАН, Институт леса им. В.Н. Сукачева; 2010. 211 с.

Volokitina AV, Sofronov MA, Korets MA, Sofronova TM, Mikhailova IA. *Forecast of Forest Fire Behavior*. Krasnoyarsk: V.N. Institute of Forest of the Siberian Division of the Russian Academy of Sciences; 2010. 211 p. (In Russ.)

13. Холопцев А.В., Никифорова М.П. *Солнечная активность и прогнозы физико-географических процессов*. Saarbrücken: Lap Lambert Academic Publishing; 2013. 333 с.

Kholoptsev AV, Nikiforova MP. *Solar Activity and Forecasts of Physical and Geographical Processes*. Saarbrücken: Lap Lambert Academic Publishing; 2013. 333 p. (In Russ.)

14. Миронов Е.У., Клячкин С.В., Макаров Е.И., Юлин А.В., Афанасьева Е.В. Особенности ледовых процессов в осенний период 2021 г. в морях Российской Арктики и оценка оправдываемости ледовых прогнозов. *Российская Арктика*. 2021;15:40–53. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2021-4-40-53>

Mironov YeU, Klyachkin SV, Makarov YeI, Yulin AV, Afanasyeva EV. Sea Ice Processes in the Russian Arctic Seas in Autumn of 2021 and Estimation of Ice Forecasts Accuracy. *Russian Arctic*. 2021;15:40–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2021-4-40-53>

15. Мелешко В.П., Гаврилина В.М., Мирвис В.М., Матюгин В.А., Пичугин Ю.А., Вавулин С.В. Гидродинамико-статистический долгосрочный прогноз метеорологических полей по модели ГГО. 2. Результаты оперативных испытаний и перспективы улучшения прогностической схемы. *Метеорология и гидрология*. 2002;10:5–17.

Meleshko VP, Gavrilina VM, Mirvis VM, Matyugin VA, Pichugin YuA, Vavulin SV. Statistical Hydrodynamic Long-Range Forecast of Meteorological Fields with the MGO Model. 2. Operational Test Results and Prospects of Improving the Prognostic Scheme. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2002;10:5–17. (In Russ.)

16. Федорова Е.Н., Пахомов Е.А. *Административно-территориальное устройство Якутии. Прошлое и настоящее*. Новосибирск: Наука; 2011. 145 с.

Fedorova EN, Pakhomov EA. *Administrative-Territorial Structure of Yakutia. Past and Present*. Novosibirsk: Nauka; 2011. 145 p. (In Russ.)

17. Hoffmann L, Dan Li, Stein O, Günther G. From ERA-Interim to ERA5: the Considerable Impact of ECMWF's Next-Generation Reanalysis on Lagrangian Transport Simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019;19(5):3097–3124. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3097-2019>

Об авторах:

Александр Вадимович Холопцев, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры «Контрольно-надзорная деятельность» Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), kholoptsev@mail.ru

Роман Геннадьевич Шубкин, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Контрольно-надзорная деятельность», Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), shubkinrg@sibpsa.24.mchs.gov.ru

Юлия Николаевна Коваль, кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой «Химия и процессы горения», Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России (662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), a_yulya@inbox.ru

Заявленный вклад авторов:

А.В. Холопцев: Разработка концепции, написание чистовика рукописи, научное руководство.

Р.Г. Шубкин: Написание черновика рукописи, визуализация.

Ю.Н. Коваль: Написание черновика рукописи, визуализация.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Aleksandr V. Kholoptsev, Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Professor of the Department of Control and Supervision, Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia (1, Severnaya St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Krai, 662972, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), kholoptsev@mail.ru

Roman G. Shubkin, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Control and Supervision, Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia (1, Severnaya St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Krai, 662972, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), shubkinrg@sibpsa.24.mchs.gov.ru

Yuliya N. Koval, Cand.Sci. (Biol.), Associate Professor, Head of the Department of Chemistry and Combustion Processes, Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia (1, Severnaya St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Krai, 662972, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), a_yulya@inbox.ru

Claimed Contributorship:

AV Kholoptsev: conceptualization, writing – review & editing, supervision.

RG Shubkin: writing – original draft preparation, visualization

YuN Koval: writing – original draft preparation, visualization

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 03.02.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 30.03.2026

Принята к публикации / Accepted 15.04.2026