

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ЦИКЛОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЛЕТНЕГО ПЕРИОДА НАД ТЕРРИТОРИЕЙ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ) В ПЕРИОД С 1950 ПО 2022 г.

Н. И. Тананаев, Ю. И. Игнатьева, М. И. Захаров*

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,

г. Якутск, РФ

*tanni@svfu.ru

Аннотация. Циркуляционные факторы определяют горимость лесов и вероятность катастрофических наводнений на Севере Сибири и Дальнего Востока РФ. В данной работе циклоническая активность летнего периода над территорией Республики Саха (Якутия) количественно оценена по данным о треках циклонов, полученных из модели реанализа ERA5. В оценке использованы количество циклонов и их центров, плотность центров циклонов и их траекторий, покрытость территории циклонами (число случаев в течение летнего периода, когда заданная точка находилась внутри области низкого давления). Основной центр циклонической активности – северо-восточная Якутия (верхняя часть бассейнов рр. Яна и Индигирка, а также среднее и нижнее течение р. Колыма), где отмечается наибольшая плотность траекторий и центров циклонов. Впервые показано существование Верхоянской области локального орографического циклогенеза. В северо-западной Якутии (бассейны рр. Анабар и Оленёк, левобережная часть бассейна верхнего Вилюя), благодаря барическим образованиям, смещающимся по северо-западу Красноярского края, отмечена наибольшая покрытость территории циклонами. В южных районах Якутии циклоническая активность летнего периода наименьшая; также это единственный район, где наиболее активны циклоны июля, а не июня. Июньские циклоны в большинстве лет преобладают в общем их летнем количестве, однако с 2014 г. преобладают июльские циклоны. Количество летних циклонов направленно увеличивалось на 0.64 циклона за 10 лет (1950–2017 гг.). В 2019–2020 гг. над регионом наблюдался исторический минимум циклонической активности, который делает данный тренд статистически незначимым. Данный минимум хронологически совпадает с другими экстремальными явлениями: наводнениями на Дальнем Востоке и в Иркутской области, маловодьем в среднем течении р. Лена (2019), мощными лесными пожарами в Якутии (2019–2021 гг.).

Ключевые слова: внетропические циклоны, траектории циклонов, плотность траекторий, климатическая изменчивость, Арктика, Республика Саха (Якутия)

Финансирование: Исследование выполнено в рамках: программы Министерства науки и высшего образования РФ «Приоритет-2030. Дальний Восток» (национальный проект «Молодежь и дети»), реализуемой ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга» (анализ пространственной изменчивости метрик циклонической активности); плана НИР по приоритетным направлениям Программы развития СВФУ им. М.К. Аммосова на 2023–2025 гг. (анализ временной изменчивости метрик циклонической активности).

Для цитирования: Тананаев Н.И., Игнатьева Ю.И., Захаров М.И. Пространственно-временные вариации циклонической активности летнего периода над территорией Республики Саха (Якутия) в период с 1950 по 2022 г. *Вестник СВФУ.* 2026;(3): 82–98. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-82-98

SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF CYCLONIC ACTIVITY DURING SUMMER SEASON OVER SAKHA (YAKUTIA) REPUBLIC FROM 1950 TO 2022

Nikita I. Tananaev, Yuliana I. Ignatyeva, Moisei I. Zakharov*

M. K. Ammosov North-Eastern Federal University,

Yakutsk, Russian Federation

*tanni@svfu.ru

Abstract. Circulation factors determine forest fire risk and the likelihood of catastrophic flooding in northern Siberia and the Russian Far East. In this study, summer cyclonic activity over the Sakha Republic (Yakutia) is quantified using cyclone track data obtained from the ERA5 reanalysis model. The assessment utilized the number of cyclones and their centers, the density of cyclone centers and trajectories, and the cyclone coverage of the territory (the number of instances during the summer when a given point was within a low-pressure area). The main center of cyclonic activity is northeastern Yakutia (the upper Yana and Indigirka river basins, as well as the middle and lower reaches of the Kolyma River), where the highest density of cyclone tracks and centers is observed. Our results support the persistence of Verkhoyansk zone of local orographic cyclogenesis. Northwestern Yakutia (the Anabar and Olenyok river basins, the left-bank part of the upper Vilyuy River basin), due to baric formations shifting across the northwest of Krasnoyarsk Krai, has the highest cyclone coverage. Summer cyclonic activity is lowest in the southern regions of Yakutia; this is also the only region where July, rather than June, cyclones are most active. June cyclones dominate the total summer cyclone count in most years; however, July cyclones have become predominant since 2014. The number of summer cyclones has consistently increased by 0.64 cyclones over the 10-year period (1950-2017). In 2019-2020, the region experienced a historical minimum in cyclonic activity, making this trend statistically insignificant. This minimum chronologically coincides with other extreme events: floods in the Far East and the Irkutsk Region, low water levels in the middle reaches of the Lena River (2019), and severe forest fires in Yakutia (2019-2021).

Keywords: extratropical cyclones, cyclone trajectories, trajectory density, climate variability, Arctic, Sakha Republic (Yakutia)

Funding: The study was conducted within the framework of the “Priority 2030. Far East” program of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (the “Youth and Children” national project), implemented by the Vitus Bering Kamchatka State University (analysis of the spatial variability of cyclonic activity metrics); the research plan for priority areas of the Ammosov NEFU Development Program for 2023-2025 (analysis of the temporal variability of cyclonic activity metrics).

For citation: Tananaev N.I., Ignatyeva Yu.I., Zakharov M.I. Spatio-temporal variability of cyclonic activity during summer season over Sakha (Yakutia) Republic from 1950 to 2022. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2026;(3): 82-98. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-82-98

Введение

Внетропические циклоны Северного полушария в летний период формируются в зоне полярного фронта, к северу от 45° с.ш., вследствие бароклинной неустойчивости. Над территорией Сибири около трех четвертей циклонов возникает на волнах фронтальных систем и значительно реже – на вторичных фронтах и в ложбине основной барической депрессии [1]. Повторяемость и траектории внетропических циклонов Северного полушария определяются активностью основных центров действия атмосферы и связаны с характеризующими их ведущими модами [2-4]. Внетропические циклоны играют важную роль в переносе тепла и влаги, их прохождение приносит резкую перемену погодных условий и определяет уровень природных рисков [5].

Ландшафтные пожары и дождевые наводнения – наиболее значимые климатические риски летнего сезона на севере Сибири и Дальнего Востока РФ, связанные с циркуляционными

факторами [6]. Жара и засухи, высокий уровень пожарной опасности сопутствуют антициклональному типу погоды. Циклональная погода с обильными осадками, напротив, повышает увлажненность и снижает горимость экосистем [7]. С другой стороны, прохождение прикаспийских циклонов над севером Сибири и Дальнего Востока РФ в отдельные годы приводит к затопу сухого теплого воздуха, усилению ветра и росту горимости лесов [8]. Ветровалы, связанные с прохождением мощных циклонов, создают запас горючего растительного материала, способствуя развитию пожаров [9-10]. Интенсивные фронтальные осадки вызывают дождевые паводки, приводящие к наводнениям и значительному ущербу поселениям [11-12]. Планирование мероприятий по адаптации к климатическим изменениям требует в том числе информации об особенностях атмосферной циркуляции и связанных с ними рисках и ущербах.

В течение долгого времени значимым и достоверным источником данных о перемещении барических образований и их параметрах служили бумажные синоптические карты. В настоящее время используются климатические реанализы, показывающие хорошую сходимость с синоптическими материалами [13-14]. Для автоматизированной обработки цифровых данных разработаны алгоритмы определения и отслеживания (трекинга) циклонов [13, 15-16]. Полученные наборы данных используются для анализа циклонической циркуляции: повторяемости циклонов, преобладающих областей циклогенеза и лизиса, траекторий перемещения (шторм-трэков) и изменения динамических характеристик циклонов во времени и пространстве [16].

В последние десятилетия в Арктике отмечается усиление циклонической активности, рост повторяемости и продолжительности жизни глубоких циклонов [17], однако неясно, насколько устойчив этот тренд. Анализ прогнозов по ансамблю климатических моделей указывает на уменьшение количества летних циклонов, плотности траекторий и потенциальной завихренности в Северном полушарии в 2080-2100 годах при всех основных сценариях МГЭИК [18], что повлияет на уровень природных рисков и его регионализацию.

Количество летних циклонов в Якутии, регионе с выраженным континентальным климатом, невелико [19]. Изменение их количества в любую сторону способно привести к засухам либо наводнениям, имеющим значимые последствия для природной среды, экономики и населения региона. Данная работа посвящена исследованию циклонической активности летнего сезона над территорией Республики Саха (Якутия), её пространственной и временной изменчивости, во второй половине XX в. и начале XXI в. В предыдущем исследовании [20] оценивалось только положение центров циклонов над территорией РС (Я) и пространственно-временная изменчивость этой характеристики. В данной работе выполняется анализ летней циклонической циркуляции с использованием расширенного набора метрик, аналогичных предложенным в проекте международного сравнения алгоритмов трэкинга циклонов [21]: плотность центров и траекторий циклонов, «покрытость» территории циклонами.

Регион исследований

Республика Саха (Якутия) – наибольший по площади административный регион России и мира (3.1 млн км²), значительная часть которого расположена в Арктической зоне РФ (рис. 1). Географическое положение определяет основные синоптические особенности региона: доминирование зимнего антициклона и циклоническая активность летнего сезона. В центральной Якутии в летний период преобладают циклоны западного переноса, проходящие с Западной Сибири к юго-западным районам Якутии или к дельте р. Лена (свыше 60 % летних циклонов). На долю выхода южных циклонов («южный процесс») приходится 30 %, циклоны «восточного процесса» и ложбины северных циклонов составляют оставшиеся 10 % [19].

Циклоническая активность летнего периода – фактор возникновения в регионе опасных гидрометеорологических явлений. Смещение на территорию Якутии циклонов, возникающих из-за разогрева поверхности над опустыненными районами Прикаспия, пустынями Гоби и Такла-Макан, приводит к возникновению по пути их следования высотных атмосферных потоков, приносящих в западную и южную Якутию горячий и сухой воздух. В период с 1979 по

2022 гг. отмечено 12 случаев выхода на территорию Якутии таких циклонов, названных “Siberian heat lows” [8]. Преобладание антициклонального типа погоды или прохождение прикаспийских циклонов повышают риски природных пожаров, в первую очередь – в западной, центральной и южной Якутии [22-23].

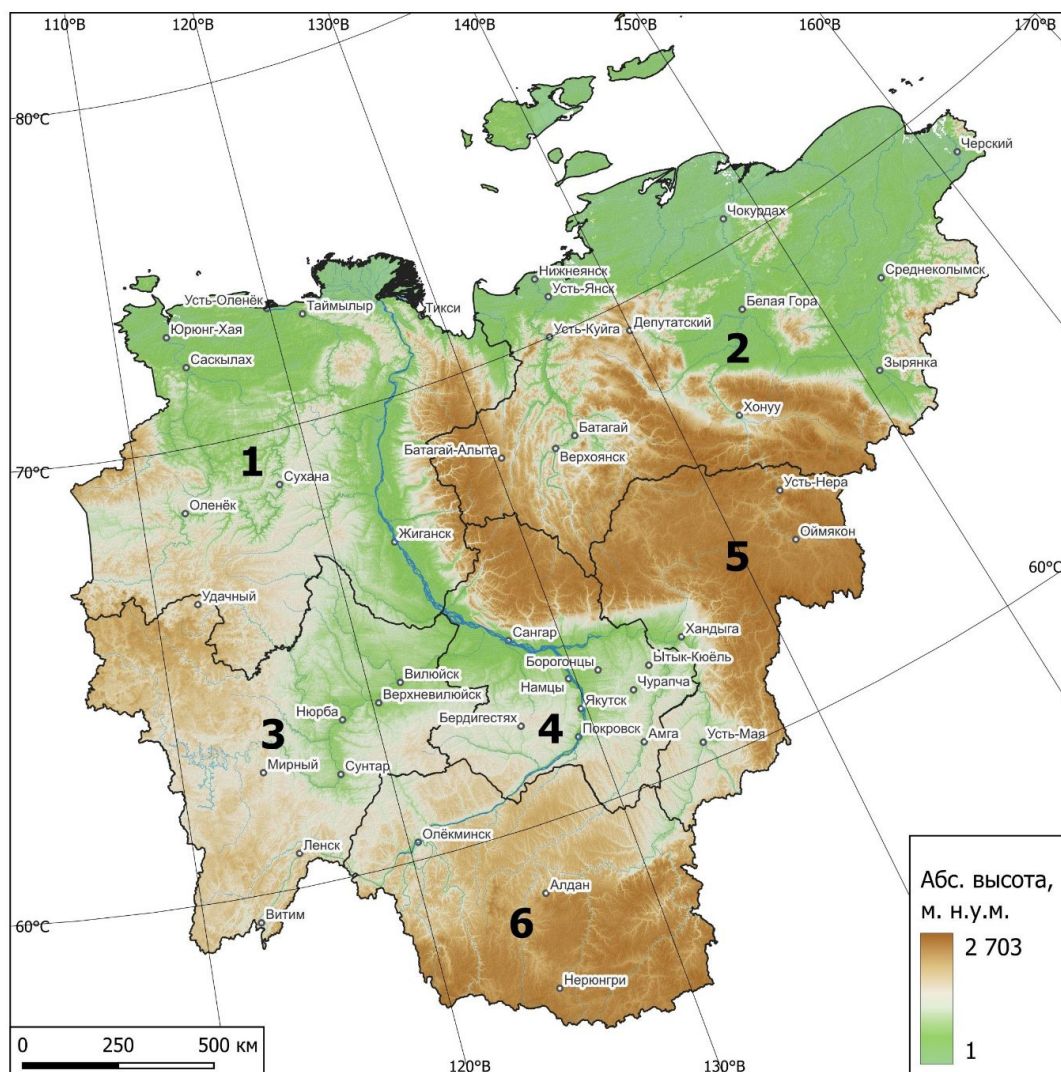


Рис. 1. Физико-географическая карта Республики Саха (Якутия). Цифрами показаны укрупненные районы: 1 – Северо-Запад, 2 – Северо-Восток, 3 – Запад, 4 – Центр, 5 – Юго-Восток, 6 – Юг

Fig. 1. General physiography of the Sakha Republic (Yakutia). Numbers correspond to macroregions used in spatial analysis: 1 – North-East, 2 – North-West, 3 – West, 4 – Center, 5 – South-East, 6 – South

Выход южных циклонов – процесс, типичный для летнего периода, приводит к резкой смене погоды, в 25 % случаев сопровождается выпадением в южной и центральной Якутии обильных осадков с суточным слоем свыше 30 мм. С «южным процессом» связан максимальный наблюдаемый суточный слой осадков в г. Якутск, 77.5 мм (26 июля 1972 г., АМСГ Якутск) [19]. Интенсивные осадки определяют повышенный риск наводнений на реках Якутии с дальневосточным типом водного режима и преобладающими дождевыми паводками – верхние

течения рр. Яна и Индигирка, их основных составляющих и притоков в пределах Верхоянского и Оймяконского улусов [11]. Совокупный прямой ущерб региону от пожаров и наводнений в 2020-2023 гг. превысил 6 млрд руб., из которых около 3.8 млрд руб. приходится на пожары 2021 г., и более 0.4 млрд руб. – на дождевое наводнение в труднодоступных районах Кобяйского и Верхоянского районов РС (Я) [11]. Дождевые наводнения также нанесли ущерб поселениям Верхоянского и Оймяконского районов РС (Я) в 2024-2026 гг., который в настоящее время оценен неполностью.

Материалы и методы

Исходные данные для анализа циклонической активности над Якутией – открытая база данных “Northern Hemisphere Extratropical Cyclone Tracks from ERA5” [24], полученная из срочных данных реанализа ERA5 (временное разрешение 3 часа). Алгоритм выявления и отслеживания циклонов описан в работе [25]. Результаты идентификации перед публикацией базы данных прошли постобработку: исключались циклоны с продолжительностью жизни менее 24 ч, циклоны с длиной трэка меньше 1000 км, и циклоны, все центры которых расположены над территорией выше 500 м над уровнем моря.

Каждому идентифицированному циклону в базе данных соответствует файл в табличном формате *.csv, в котором записи, соответствующие каждому установленному центру циклона в срок наблюдения соответствуют сведения о пространственном положении центра циклона на трэке (широта, долгота); характеристиках поля давления на уровне моря в центре и на периферии циклона; лапласиане давления в центре циклона; площади циклона в пределах последней замкнутой изобары; эквивалентного радиуса циклона (радиуса окружности с площадью, равной площади циклона). Полное описание переменных, составляющих базу данных, приведено в мета-описании [24].

Дополнительная обработка данных, выполненная авторами, включала:

1. Удаление центров циклонов, в которых эквивалентный радиус циклона меньше 15 км. Данная процедура отфильтровывает центры циклонов с нулевым радиусом, а также центры циклонов, у которых единственная замкнутая изобара соединяет центры соседних ячеек сетки реанализа ERA5. Площадь такого циклона всегда равна 625 км², а эквивалентный радиус несколько больше 14 км.

2. Преобразование табличных данных в векторный формат *.shp, формирование трэков из центров циклонов (создание линейных объектов), их перепроецирование в эквидистантную азимутальную проекцию, без чего невозможен корректный геопространственный анализ.

3. Построение вокруг каждого центра циклона «буферных зон», окружностей с радиусом, равным значению эквивалентного радиуса циклона (см. выше), исключение из анализа циклонов, условная граница которых (последняя замкнутая изобара) не пересекала границу РС (Я).

Геопространственные расчеты выполнялись в ГИС QGIS 3.28, свободно распространяемом программном обеспечении. Для каждого месяца и всего летнего сезона определялись следующие характеристики:

1. *Плотность траекторий циклонов*: суммарная протяженность всех отрезков траекторий циклонов, попадающих внутрь окружности радиусом 50 км, построенной вокруг центра ячейки сетки реанализа ERA5, отнесенная к площади этой окружности. Расчет плотности траекторий выполнялся с помощью инструмента QGIS «Плотность линий», поиск траекторий проводился в радиусе 50 км, результат пересчитывался на площадь 1000 км².

2. *Покрываемость территории циклонами*: количество случаев, когда ячейка сетки размером 10х10 км, на которые разбита территория РС (Я), находилась внутри окружности, построенной вокруг центра циклона, с радиусом, равным значению эквивалентного радиуса циклона. Расчет выполнен с помощью инструмента QGIS «Буферизация переменной ширины», пространственное разрешение итогового растрового покрытия – 10 км.

3. *Плотность центров циклонов*, рассчитанная методом ядерной оценки плотности (kernel density estimation) с радиусом поиска 125 км. Расчет выполнялся с помощью QGIS Density Analysis Plugin, версия 2024.1.23.

Ретроспективный анализ пространственно-временной изменчивости летней циклонической активности в регионе выполнен в разбивке по шести укрупненным регионам в пределах Якутии (рис. 1). Статистические расчеты выполнены в RStudio v. 4.2.3, графическом интерфейсе пользователя языка R. Анализ трендов использует тест Манна-Кендалла, реализованный в функции *mk.test()* пакета ‘trend’ [26]. Вейвлет-анализ выполнен с помощью набора функций пакета ‘WaveletComp’ [27], использован комплексный вейвлет Морле.

Результаты и обсуждение

Пространственное распределение циклонической активности

Траектории циклонов. Циклоническая активность летнего периода имеет максимум в июне, когда отмечается наибольшая плотность траекторий циклонов над всей территорией РС (Я), кроме южных районов (табл. 1). В июле циклоническая активность возрастает и достигает максимума только в южной Якутии, где в это время учащается выход южных циклонов. Вероятно, это связано с общим ростом интенсивности муссонной циркуляции на Дальнем Востоке РФ, в отдельные годы – с активизацией охотоморского антициклона и развитием на его западной периферии циклонов-волн, смещающихся в южную Якутию.

Таблица 1

Средняя плотность траекторий циклонов над районами РС (Я), км/1000 км²

Table 1

Mean storm-track density over Yakutian regions, km/1000 km²

Период	В	З	СВ	СЗ	Ц	Ю
Июнь	0.22 ± 0.11	0.23 ± 0.06	0.31 ± 0.19	0.26 ± 0.08	0.20 ± 0.06	0.15 ± 0.06
Июль	0.16 ± 0.07	0.17 ± 0.06	0.23 ± 0.12	0.21 ± 0.06	0.18 ± 0.06	0.17 ± 0.08
Август	0.13 ± 0.05	0.14 ± 0.05	0.21 ± 0.10	0.19 ± 0.07	0.14 ± 0.06	0.13 ± 0.04
Лето	0.51 ± 0.20	0.53 ± 0.13	0.75 ± 0.38	0.66 ± 0.17	0.53 ± 0.13	0.45 ± 0.15

Средняя плотность траекторий летних циклонов на территории РС (Я) в период с 1950 по 2022 гг. составляет 0.61 км/1000 км², в том числе в июне – 0.24 км/1000 км², в июле – 0.20 км/1000 км², в августе – 0.17 км/1000 км². Наибольшая плотность траекторий – в северных районах, наименьшая – в южной и восточной Якутии (табл. 1).

Основные пространственные паттерны перемещения циклонов сохраняются во все летние месяцы и находят отражение в итоговой сезонной статистике (рис. 2). В течение всего летнего сезона выраженный максимум плотности траекторий циклонов расположен над северо-восточной Якутией, приблизительно следуя линии Батагай – Усть-Мома – Зырянка. В этом районе пересекаются траектории: (а) циклонов западного переноса, проходящих над Верхоянским хребтом к северу от Полярного круга; (б) западных и южных циклонов, проходящих над Верхоянским хребтом в его субширотной части; (в) охотоморских циклонов, перемещающихся к северу; (г) местных циклонов, зарождающихся над Янским плоскогорьем. Одновременно циклоны смещаются над Колымской низменностью в субмеридиональном направлении вдоль долины р. Колыма с выходом на акваторию Северного Ледовитого океана (см. рис. 2). Отмечаются случаи возврата таких циклонов на материк и их прохождения в обратном направлении, в сторону верховьев р. Колыма.

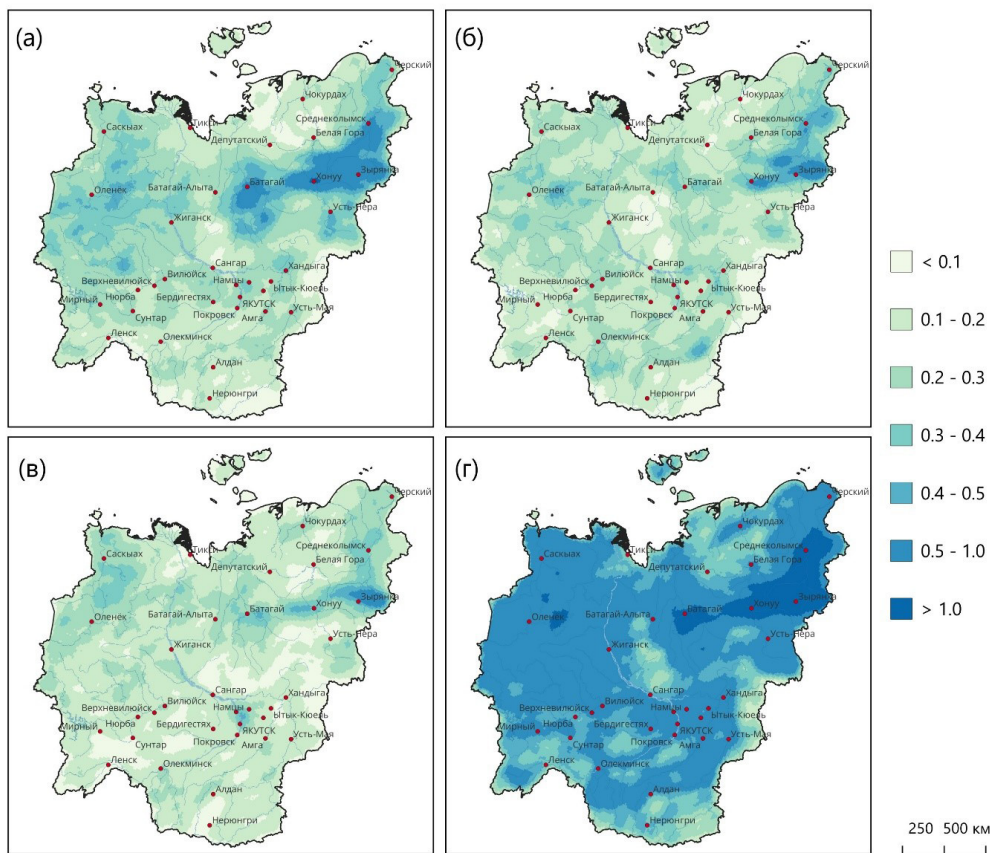


Рис. 2. Плотность траекторий циклонов над территорией РС (Я), км на 1000 км²:
(а) июнь, (б) июль, (в) август, (г) летний период

Fig. 2. Density of storm tracks over the Sakha Republic (Yakutia), km/1000 km²:
(a) June, (b) July, (c) August, (d) summer

Верхоянский хребет – значимый орографический барьер для смещающихся барических образований. Плотность траекторий циклонов над ним невелика. Основные «окна», в которых циклоны пересекают хребет: в субмеридиональной части – по широте 68° с.ш., а в июне – также южнее, по широте Полярного круга; в субширотной части – в районе устья р. Алдан. В июне-июле преобладает переход циклонов через Верхоянский хребет в его субширотной части, в августе – на субмеридиональном участке. Локальный максимум плотности траекторий в северо-восточной Якутии предполагает устойчивое существование в летний период Верхоянской области локального циклогенеза, существование которой связано с орографическим фактором. Новые циклоны зарождаются на подветренном склоне субмеридиональной части Верхоянского хребта, вероятно, в результате сегментации циклонов западного переноса, активных в первую половину лета.

Покрытость территории циклонами. Данный показатель, в отличие от плотности траекторий, учитывает барические образования, центры которых располагались за пределами Якутии, но область пониженного давления захватывала отдельные области региона.

Средняя многолетняя покрытость территории РС (Я) циклонами в летний период составляет 7.9 суток (63.2 срока), в том числе в июне – 2.8 суток (22.1 срока), в июле – 2.7 суток (21.3 срока), в августе – 2.5 суток (19.9 срока), еще раз указывая на общее преобладание июньских циклонов. В южной и центральной Якутии чаще повторяются июльские циклоны, а в восточной Якутии вторые после июньских – циклоны августа (табл. 2).

Таблица 2

Средняя «покрытость» циклонами районов РС (Я), количество случаев

Table 2

Mean cyclone coverage of the Yakutian regions, number of occurrences

	В	З	СВ	СЗ	Ц	Ю
Июнь	20.1 ± 3.1	24.5 ± 3.9	23.3 ± 1.5	28.6 ± 3.1	20.3 ± 1.8	15.8 ± 1.8
Июль	18.6 ± 1.4	22.0 ± 2.4	22.2 ± 1.8	24.4 ± 1.9	21.0 ± 1.0	19.5 ± 1.3
Август	19.2 ± 0.9	19.8 ± 2.0	20.0 ± 1.6	23.2 ± 1.8	18.5 ± 0.5	18.5 ± 0.7
Лето	57.9 ± 4.5	66.2 ± 7.8	65.5 ± 3.8	76.2 ± 6.3	59.9 ± 2.8	53.7 ± 2.8

Во все летние месяцы и за сезон в целом под наибольшим влиянием циклонов находится западная и северо-западная Якутия в пределах бассейнов рр. Анабар и Оленек, верхней части бассейна р. Вилюй (рис. 3). Эти районы чаще, чем северо-восточная Якутия, оказываются под влиянием циклонов, смещающихся над севером Красноярского края (в июне), либо арктических циклонов, проходящих над акваторией Северного Ледовитого океана (в июле-августе). Наименьшая покрытость циклонами – в южной Якутии, где снова укажем на небольшую активность июньских циклонов (см. рис. 3).

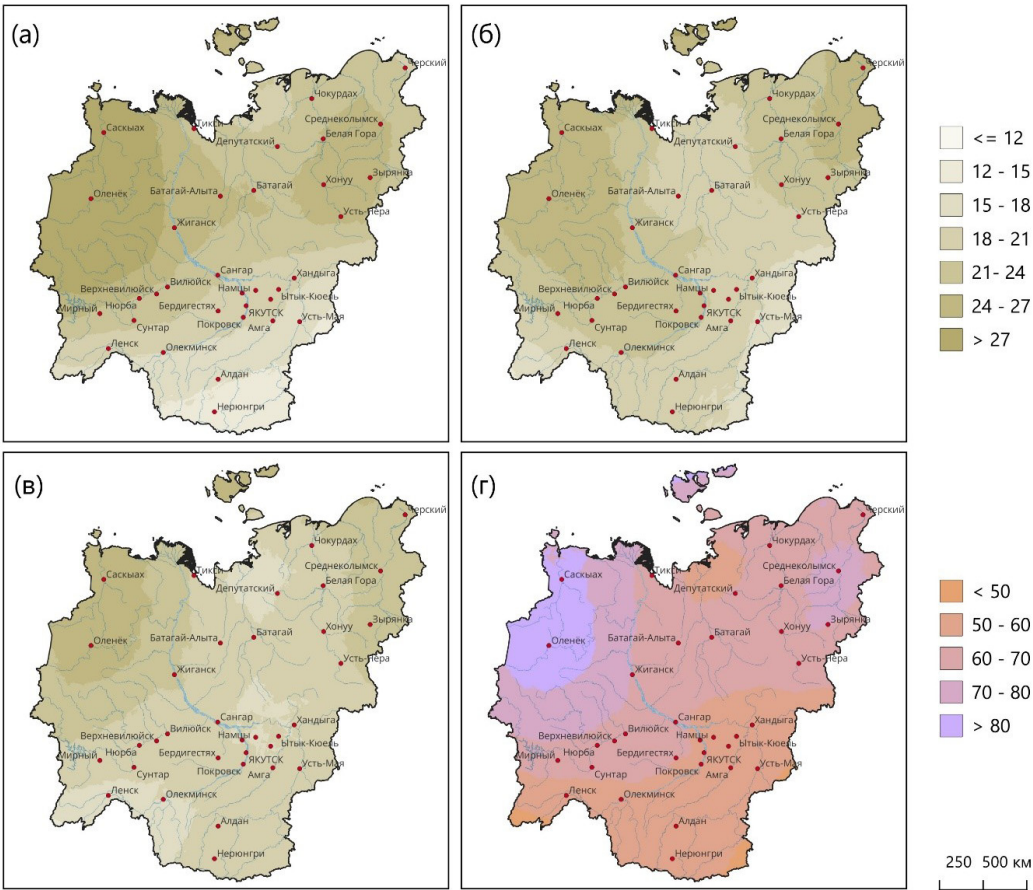


Рис. 3. Покрытость территории РС (Я) циклонами, количество случаев: (а) июнь, (б) июль, (в) август, (г) летний период.

Fig. 3. Cyclone coverage over Sakha Republic (Yakutia), number of occurrences: (a) June, (b) July, (c) August, (d) summer

Плотность центров циклонов. В летний период локальные максимумы плотности центров циклонов отмечаются: над северо-западной Якутией, где проходят циклоны западного переноса; над северо-восточной Якутией – на Янском плоскогорье и с подветренной стороны Момского хребта в районе с. Хонуу (Усть-Мома), где они связаны с локальным орографическим циклогенезом; южнее пос. Зырянка, в «кармане» между Момским хребтом и Юкагирским плоскогорьем.

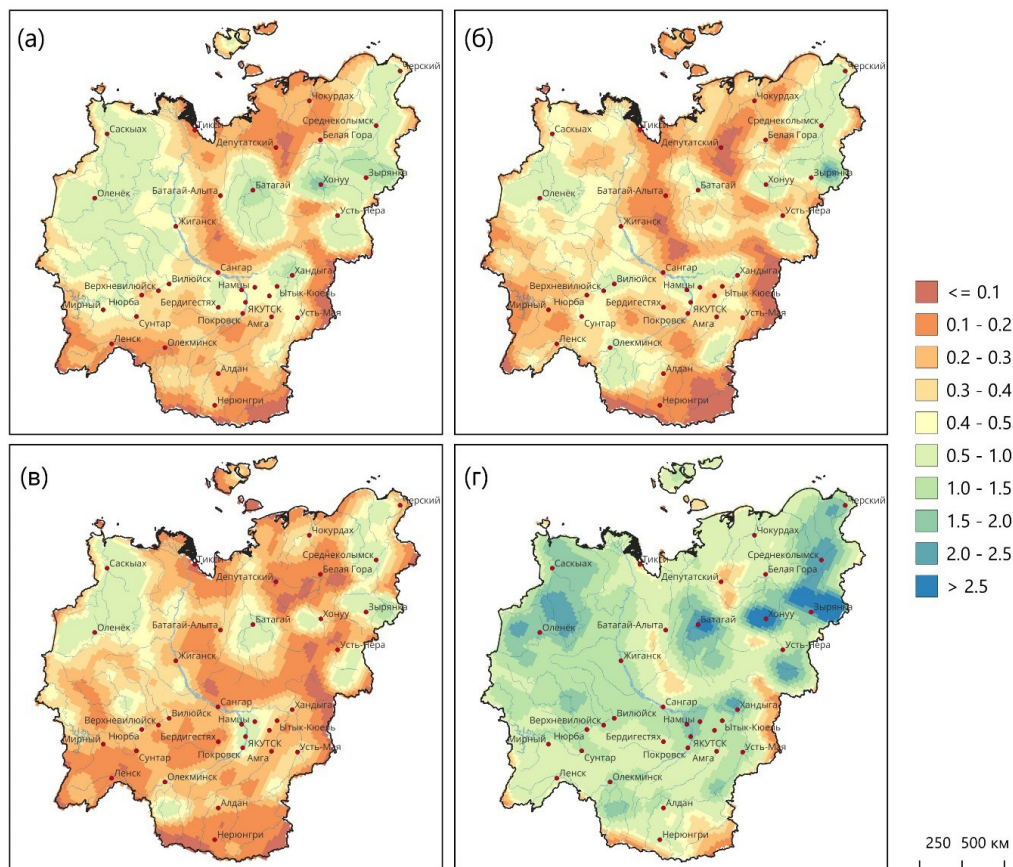


Рис. 4. Плотность центров циклонов, случаи за период (месяц, сезон):
(а) июнь, (б) июль, (в) август, (г) летний период

Fig. 4. Density of cyclone centers over Sakha Republic (Yakutia), occurrences per period (month, season):
(a) June, (b) July, (c) August, (d) summer

Самое «посещаемое» циклонами место в Якутии; в центральной Якутии – в предгорьях Верхоянья, где происходит торможение и лизис южных циклонов (рис. 4). В августе плотность центров циклонов возрастает в центральной Якутии, в районе г. Якутск. Вероятно, в конце летнего сезона в этом районе замедляются и заполняются южные циклоны, энергии которых не хватает для пересечения Верхоянского хребта. Смена основного «окна» пересечения этого орографического препятствия с субширотной части на субмеридиональную, отмеченная выше, подтверждает данное предположение.

Наименьшая плотность центров циклонов отмечается в горных районах (см. рис. 4): Верхоянский хребет, Алданское нагорье, левобережная часть Приленского плато, а также на Приморских низменностях в приустьевых частях рр. Яна и Индигирка. При наибольшей плотности траекторий циклонов на северо-востоке РС (Я), плотность центров циклонов на северо-западе незначительно меньше, а в августе – даже больше (табл. 3).

Таблица 3

Плотность центров циклонов по районам РС (Я), случаев за период (месяц, сезон)

Table 3

Cyclone centers density over Yakutian regions, occurrences per period (month, season)

	В	З	СВ	СЗ	Ц	Ю
Июнь	0.40 ± 0.24	0.38 ± 0.13	0.51 ± 0.34	0.49 ± 0.16	0.34 ± 0.12	0.24 ± 0.09
Июль	0.31 ± 0.17	0.31 ± 0.10	0.41 ± 0.29	0.39 ± 0.15	0.34 ± 0.13	0.29 ± 0.19
Август	0.24 ± 0.13	0.25 ± 0.09	0.33 ± 0.18	0.38 ± 0.17	0.27 ± 0.17	0.22 ± 0.11
Лето	0.96 ± 0.52	0.97 ± 0.27	1.30 ± 0.76	1.30 ± 0.43	0.97 ± 0.34	0.75 ± 0.35

Наименьшая плотность центров циклонов среди регионов – в южной Якутии, среди месяцев – в августе. За весь период 1950-2022 гг. среднее по территории РС (Я) количество центров циклонов летнего сезона на территории РС (Я) – 78, в том числе в июне – 30, в июле – 26, в августе – 22 центра циклона.

Временная изменчивость циклонической активности

В течение летнего периода над территорией Республики Саха (Якутия) в среднем за период с 1950 по 2022 гг. проходило 36 ± 6 циклонов, включая те, центры которых находились за пределами региона; в июне – 13 ± 3.5 , в июле – 12 ± 3.0 , в августе – 11 ± 3.4 , то есть 37 %, 32 % и 31 %, соответственно. Наибольшее сезонное количество циклонов – 53 (1989 г.), в разбивке по месяцам: 22 циклона в июне (1987 и 1989 гг.), по 20 – в июле (2018 г.) и августе (2007 г.); наименьшее количество – 20 (2019 г.), в разбивке по месяцам: 5 циклонов в июне (2020 г.), 4 – в июле (2009 г.), 3 – в августе (1969 г.). Независимо от общего количества циклонов летнего периода, доля каждого месяца изменяется незначительно, однако наблюдается межгодовая изменчивость. Отмечаются периоды относительного преобладания циклонов августа (1950-е гг.), июня (с середины 1960-х гг. по середину 1970-х гг., затем в 1980-х и начале 1990-х гг.), июля (с середины 2010-х гг.), а также периоды их равномерного распределения в течение лета (1990-е гг.) (рис. 5).

Исторический минимум циклонической активности наблюдался над территорией Якутии в 2019-2020 гг. (см. рис. 5), что мы связываем с высокой интенсивностью Сибирского антициклона над территорией севера Сибири и Дальнего Востока РФ в летний период, выраженным эффектом атмосферного блокирования и перестройкой траекторий циклонов в Азиатской части РФ. Требуем проверки предположения о связи минимумов циклонической активности с индексами циркуляции, например, отрицательной фазой Арктического/Северо-атлантического колебания [28], холодной фазой Эль-Ниньо – Южного колебания (Ла Нинья) [29].

В 2019 г. на большей части бассейна р. Лена наблюдалось опасное гидрометеорологическое явление – маловодье, по некоторым постам продолжительностью 40 дней и более [20]. В 2020 г., при полном отсутствии июньских циклонов над регионом (см. рис. 5), в Арктической зоне РС (Я) установилась аномально жаркая антициклональная погода, приведшая к температурному рекорду, зафиксированному ВМО: самая высокая наблюденная температура воздуха Северного полушария за Полярным кругом, $+38.0^{\circ}\text{C}$ (м/с Верхоянск)

Длительное отсутствие циклонов и малое количество летних осадков, как можно предположить, привели к общему иссушению экосистем и интенсивным лесным пожарам 2019-2020 гг. В 2021 г. восстановление циклонической циркуляции в весенне-летний период началось с северных районов, тогда как в южной, центральной и западной Якутии продолжался дефицит циклонов и связанная с ним засуха. В процессе восстановления циркуляции в первой половине июля жаркая погода поддерживалась притоком горячего сухого воздуха из Прикаспия [8], что в совокупности с высокой ветровой нагрузкой при циклональном типе погоды также

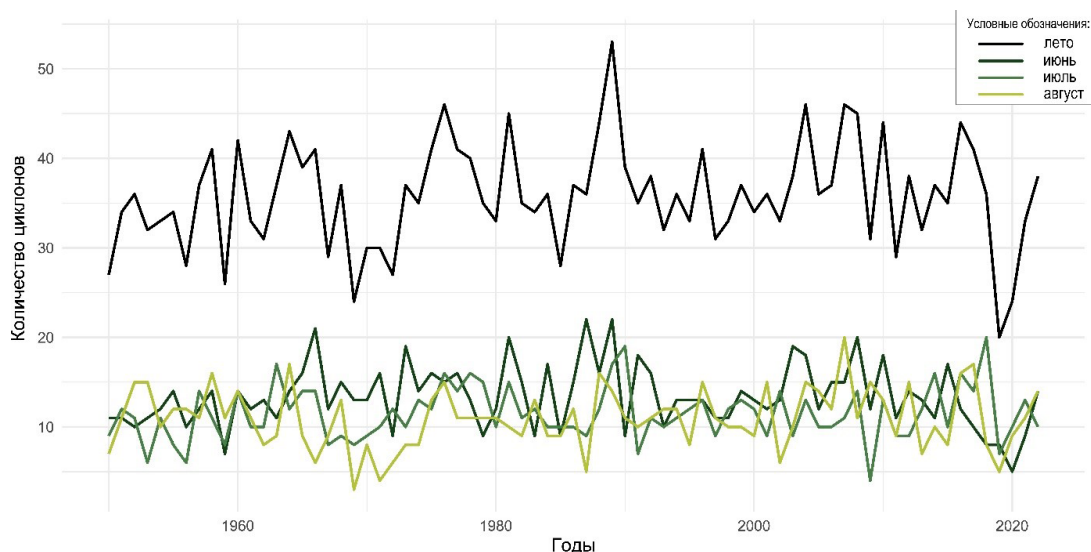


Рис. 5. Количество циклонов летнего периода, проходящих через территорию Якутии в период с 1950 по 2022 г., по месяцам и для летнего сезона в целом

Fig. 5. Number of summer cyclones over Yakutia in 1950-2022, by months and for overall summer season

способствовало повышенной горимости лесов и привело к выдающемуся пожарному максимуму 2021 г. Косвенно это подтверждается данными о количестве очагов пожаров и пройденной ими площади: в 2021 г. средняя площадь, пройденная одним пожаром, вдвое превышала таковую в 2019 и 2020 гг. Число лесных пожаров составило в 2019 г. – 1865, в 2020 г. – 2061, в 2021 – 1697, по сравнению с 600 пожарами и менее в другие годы; площадь лесных пожаров в 2019 г. – 3.195 млн га, в 2020 г. – 4.812 млн га, в 2021 г. – 7.989 млн га, тогда как в предыдущие годы не превышала 1 млн га [30].

Количество летних циклонов увеличивается со временем, однако этот восходящий тренд валиден только до конца 2010-х гг. ($p < 0.05$), составляя $+0.64 \pm 0.02$ циклона за 10 лет (непараметрическая оценка Тейла-Сена, 1950-2018 гг.). Включение в анализ периода с 2018 по 2022 г. снижает значимость тренда до $p > 0.20$. Количество циклонов в отдельные месяцы лета статистически неизменно ($p > 0.10$). Следовательно, тренд в сезонных данных складывается из асинхронных изменений количества циклонов в отдельные месяцы летнего сезона, либо по отдельности интенсивность изменений в отдельные месяцы недостаточно значима.

Приведенные на рис. 5 ряды количества циклонов имеют признаки периодичности, которые, однако, нарушаются минимумом 2019-2022 годов. Спектры мощности, полученные по результатам вейвлет-анализа (рис. 6), указывают на преобладание во все месяцы и за летний сезон в целом высокочастотной изменчивости с ведущим периодом 2-4 года, которая нарушается кратковременными сериями повышенной и пониженной активности циклонической циркуляции. Вторым по значимости выступает декадный цикл (8-12 лет), который в июне-июле выходит на передний план. Вероятно, с таким же ведущим периодом изменяется вероятность опасных гидрометеорологических явлений летнего периода. Пожарные максимумы 2002-2003, 2010-2011 и 2018-2021 гг. следуют квазидекадному циклу, тогда как повторяемость дождей наводнений на Северо-Востоке соответствует короткопериодному циклу: 2004, 2008, 2013, 2022 и 2025-2026 гг.

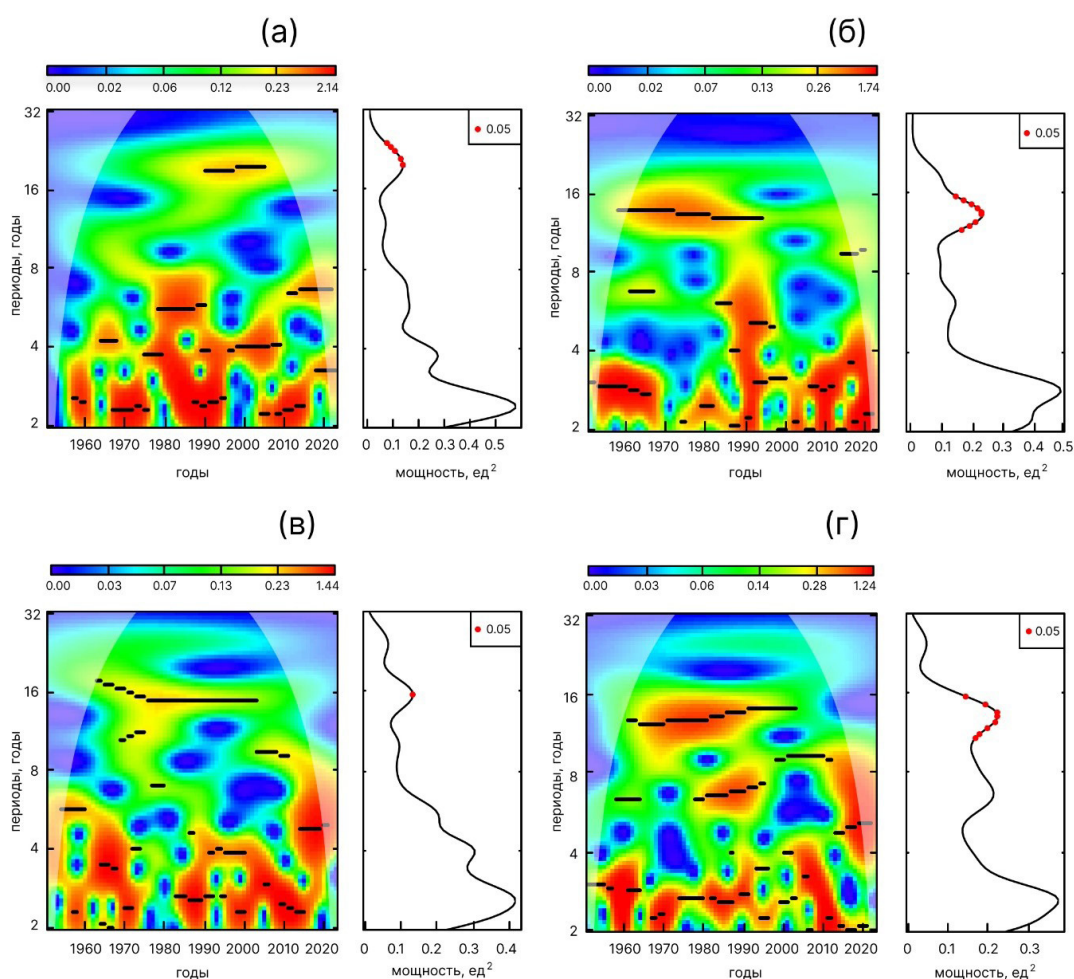


Рис. 6. Вейвлет-спектры мощности рядов количества циклонов над территорией РС (Я): (а) июнь, (б) июль, (в) август, (г) летний период.

Fig. 6. Wavelet power spectra of the series of the number of cyclones over the territory of the Sakha Republic (Yakutia): (a) June, (b) July, (c) August, (d) summer

Декадный цикл выраженно проявлен в 1970-х – 1990-х гг., однако затем затухает, сменяясь преобладанием короткопериодных колебаний. Хронологически смена режимов циркуляции соответствует смене фаз Тихоокеанского декадного колебания: декадный цикл проявляется в период положительной фазы Тихоокеанского декадного колебания (1977-1998 гг.) и затухает в периоды его отрицательной фазы. Необходим дальнейший анализ соответствий между циклонической активностью в регионе, в том числе в зимний сезон, и основными режимами атмосферной циркуляции, выраженными в соответствующих индексах: Северо-Атлантическое или Арктическое колебание, индекс Сибирского антициклона и др. Пространственные различия ведущих мод временной изменчивости также требуют дальнейшего анализа. Данный подход в будущем позволит давать заблаговременную оценку вероятности опасных явлений по макро-регионам Республики Саха (Якутия).

Заключение

Выполненное исследование детально характеризует циклоническую активность летнего сезона над территорией Республики Саха (Якутия) в период с 1950 по 2022 г. В среднем за летний сезон над территорией РС (Я) проходит 36 ± 6 циклонов. С 2014 года отмечается преобладание циклонов июля, хотя в предыдущее десятилетие они были в меньшинстве, и более пятидесяти лет доминировали циклоны июня. Количество летних циклонов направленно увеличивалось на 0.64 циклона за 10 лет (1950-2017 гг.). В 2019-2020 годах над регионом наблюдался исторический минимум циклонической активности, который делает данный тренд статистически незначимым.

Циклоническая активность приурочена к северной части региона. В северо-восточной Якутии, в верховьях рр. Яна, Индигирка и Колыма, отмечается наибольшая плотность траекторий циклонов и центров циклонов. В данной работе впервые показано существование в летний сезон Верхоянской области локального орографического циклогенеза с центром в районе Янского плоскогорья, действие которой определяет погодные условия Северо-Востока РФ. Данная область циклогенеза активна в июне-июле, когда смещающиеся в этой области циклоны западного переноса задерживаются орографическим барьером Верхоянья. Циклоны, связанные с «южным процессом», напротив, в июне-июле устойчиво пересекают субширотную часть Верхоянских гор. В августе интенсивность южных циклонов снижается, центральная Якутия становится областью лизиса, тогда как циклоны западного переноса пересекают субмеридиональную часть Верхоянского хребта в полосе от 66° до 68° с.ш.

Покрытость территории циклонами, напротив, выше на северо-западе Якутии, в бассейнах рр. Анабар и Оленек, в связи с частым прохождением циклонов над территорией Красноярского края. Южная Якутия отличается преобладанием июльских циклонов, что связано с большей вероятностью нарушения зональной циркуляции в это время, когда наблюдается «выход южных циклонов».

Временная изменчивость циклонической активности характеризуется короткопериодными колебаниями (2-4 года), на которые накладывается квазидекадный (8-12 лет) цикл. Предполагается, что вероятность опасных гидрометеорологических явлений летнего периода следует за ведущими модами изменчивости. Исторический минимум циклонической активности 2019-2021 годов совпадает по времени с маловодьем на средней и нижней Лене (2019), температурным рекордом севернее Полярного круга (2020), экстремальными лесными пожарами (2019-2021). В этом контексте перспективным направлением региональных исследований выглядит изучение синоптических обстановок, при которых развиваются продолжительные атмосферные блокировки, препятствующие прохождению летних циклонов над территорией РС (Я), а также повторяемость таких обстановок в климате будущего. Предложенный анализ позволит оценить точность климатических моделей в воспроизведении таких синоптических обстановок, их повторяемость в современных условиях и в климате будущего.

Литература

1. Горбатенко В.П., Тунаев Е.Л., Пустовалов К.Н., Волкова М.А., Нечепуренко О.Е. Изменения циклогенеза над Западной Сибирью в 1976-2017 гг. *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2020;(2): 35–57.
2. Бардин М.Ю., Платова Т.В., Самохина О.Ф. Особенности изменчивости циклонической активности в умеренных широтах Северного полушария, связанные с ведущими модами атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе. *Фундаментальные проблемы климатологии*. 2015;(2):14–40.
3. Catto J.L. Extratropical cyclone classification and its use in climate studies. *Reviews of Geophysics*. 2016;54(2):486–520. DOI: 10.1002/2016RG000519.
4. Gulev S.K., Zolina O., Grigoriev S. Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP/NCAR reanalysis data. *Climate Dynamics*. 2001;17:795–809. DOI: 10.1007/s003820000145.

5. Нестеров Е.С. Экстремальные циклоны над морями европейской части России. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2018;1(367):97–115.
6. Вологжина С.Ж., Латышева И.В., Лощенко К.А. Циркуляционные факторы лесных пожаров на территории Сибири и Якутии в начале XXI в. *Вестник ЗабГУ*. 2022;28(5):6–18.
7. Hayasaka H., Yamazaki K., Naito D. Weather conditions and warm air masses in southern Sakha during active forest fire periods. *Journal of Disaster Research*. 2019;14(4): 641–648. DOI: 10.1016/j.polar.2019.07.002.
8. Schnyder F. *Dynamics of Siberian summer cyclones*. Master Thesis. Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH Zurich). 2023. 63 p.
9. Иванов А.В., Сало М.А., Бондарчук С.Н., Кочкарина Н.А. Воздействие пожара и ветровала на фитоценоз кедрово-широколиственного леса (по данным мониторинга за 60 лет). *Сибирский лесной журнал*. 2020;(5):3–10. DOI: 10.15372/SJFS20200501.
10. Сидоренков В.М., Аваков Я.А., Сидоренкова Е.М., Жафяров А.В., Степанова С.К. Оценка рисков возникновения лесных пожаров в природном заповеднике “Буреинский” на основе геоинформационного анализа региональных особенностей территории и природных комплексов. *Лесохозяйственная информация: электронный сетевой журнал*. 2017;(4):102–110.
11. Саввинова А.Н., Гаврильева Т.Н., Парфенова О.Т., Филиппова В.В., Тананаев Н.И. Восприятие населением гидрологических рисков и компенсация ущерба от наводнений в Республике Саха (Якутия). *Арктика: экология и экономика*. 2024;14(1):103–115.
12. De Luca P., Hillier J.K., Wilby R.L., Quinn N.W., Harrigan S. Extreme multi-basin flooding linked with extra-tropical cyclones. *Environmental Research Letters*. 2017;12(11):114009. DOI: 10.1088/1748-9326/aa868e.
13. Walker E., Mitchell D., Seviour W. The numerous approaches to tracking extratropical cyclones and the challenges they present. *Weather*. 2020;75(11):336–341. DOI: 10.1002/wea.3861.
14. Поднебесных Н.В., Ипполитов И.И. Крупномасштабная атмосферная циркуляция над Сибирью в конце XX – начале XXI веков: сравнение данных, полученных на основе приземных синоптических карт и реанализа. *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2019;(2):34–44.
15. Murray R.J., Simmonds I. A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: development and operation of the scheme. *Australian Meteorological Magazine*. 1991;39:155–166.
16. Sinclair M.R. Objective identification of cyclones and their circulation intensity, and climatology. *Weather and Forecasting*. 1997;12(3):595–612. DOI: 10.1175/1520-0434(1997)012<0595:OIOC>>2.0.CO;2.
17. Zhang X., Tang H., Zhang J., Walsh J.E., Roesler E.L., Hillman B., Ballinger T.J., Weijer W. Arctic cyclones have become more intense and longer-lived over the past seven decades. *Communications Earth & Environment*. 2023;4:348. DOI: 10.1038/s43247-023-01003-0.
18. Priestley M.D.K., Catto J.L. Future changes in the extratropical storm tracks and cyclone intensity, wind speed, and structure. *Weather & Climate Dynamics*. 2022;3(1):337–360. DOI: 10.5194/wcd-3-337-2022.
19. Климат Якутска (под ред. Швер Ц.А., Изюменко С.А.). Л.: Гидрометеиздат; 1982. 246 с.
20. Игнатъева Ю.И., Тананаев Н.И. Повторяемость циклонов над территорией Республики Саха (Якутия) в летние месяцы. *Вестник СВФУ. Серия «Науки о Земле»*. 2024;2(34):46–53.
21. Neu U., Akperov M.G., Bellenbaum N., Benestad R., Blender R., Caballero R., Coccozza A., Dacre H.F., Feng Y., Fraedrich K., Grieger J., Gulev S., Hanley J., Hewson T., Inatsu M., Keay K., Kew S.F., Kindem I., Leckebusch G.C., Liberato M.L.R., Lionello P., Mokhov I.I., Pinto J.G., Raible C.C., Reale M., Rudeva I., Schuster M., Simmonds I., Sinclair M., Sprenger M., Tilinina N.D., Trigo I.F., Ulbrich S., Ulbrich U., Wang X.L., Wernli H. IMILAST: a community effort to intercompare extratropical cyclone detection and tracking algorithms. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2013;94(4):529–547. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00154.1.
22. Габышева Л.П., Протопопова В.В. Характеристика горимости лесов на территории Республики Саха (Якутия). *Известия Самарского научного центра РАН*. 2018;20(5):87–91.
23. Янец П.К., Гадаль С., Иванова С. Моделирование риска лесных пожаров в Республике Саха (Якутия) методами ГИС. *Успехи современного естествознания*. 2019;(11):37–42.
24. Crawford A., Barber D., Dahl-Jensen D., et al. Hemisphere Extratropical Cyclone Tracks from ERA-5 [Data set]. 2020. CanWIN. DOI: 10.34992/ebnw-s681.
25. Crawford A., Schreiber E.A.P., Sommer N., Serreze M.C., Stroeve J.C., Barber D.G. Sensitivity of Northern Hemisphere cyclone detection and tracking results to fine spatial and temporal resolution using ERA5. *Monthly Weather Review*. 2021;149(8):2581–2598. DOI: 10.1175/MWR-D-20-0417.1.

26. Pohlert T. trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. R package version 1.1.5, <<https://CRAN.R-project.org/package=trend>>. 2023.
27. Roesch A., Schmidbauer H. WaveletComp: Computational Wavelet Analysis. R package version 1.1, <<https://CRAN.R-project.org/package=WaveletComp>>. 2018.
28. Churakova-Sidorova O.V., Siegwolf R.T.W., Fonti M.V., Vaganov E.A., Saurer M. Spring arctic oscillation as a trigger of summer drought in Siberian subarctic over the past 1494 years. *Scientific Reports*. 2021;11:19010. DOI: 10.1038/s41598-021-97911-2.
29. Shi C., Liang Y., Gao C., Wang Q., Shu L. Drought-modulated boreal forest fire occurrence and linkage with La Nina events in Altai Mountains, Northwest China. *Atmosphere*. 2020;11(9):956. DOI: 10.3390/atmos11090956.
30. Постникова П.О., Парникова С.П., Тананаев Н.И., Парфенова О.Т. Влияние климатических изменений на частоту и интенсивность лесных пожаров: перспективы, последствия и риски // Экономика и природопользование на Севере. 2024. № 1. С. 56–62.

References

1. Gorbatenko V.P., Tunaev E.L., Pustovalov K.N., Volkova M.A., Nechepurenko O.E. The dynamics of cyclogenesis over Western Siberia in 1976-2017. *Fundamental and Applied Climatology*. 2020;(2):35–57 (in Russian).
2. Bardin M.Yu., Platova T.V. Samokhina O.F. Specific features of variability of cyclone activity in northern extratropics associated with leading atmospheric circulation modes in Atlantic-European sector. *Fundamental and Applied Climatology*. 2015;(2):14–40 (in Russian).
3. Catto J.L. Extratropical cyclone classification and its use in climate studies. *Reviews of Geophysics*. 2016;54(2):486–520. DOI: 10.1002/2016RG000519.
4. Gulev S.K., Zolina O., Grigoriev S. Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP/NCAR reanalysis data. *Climate Dynamics*. 2001;17:795–809. DOI: 10.1007/s003820000145.
5. Nesterov E.S. Extreme cyclones over the seas of the European part of Russia. *Hydrometeorological Research and Forecasts*. 2018;1(367): 97–115 (in Russian).
6. Vologzhina S., Latysheva I., Loschenko K. Circulation factors of forest fires in Siberia and Yakutia at the beginning of the XXI century. *Bulletin of ZabGU*. 2022;28(5):6–18 (in Russian). DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-5-6-18.
7. Hayasaka H., Yamazaki K., Naito D. Weather conditions and warm air masses in southern Sakha during active forest fire periods. *Journal of Disaster Research*. 2019;14(4): 641–648. DOI: 10.1016/j.polar.2019.07.002.
8. Schnyder F. *Dynamics of Siberian summer cyclones*. Master Thesis. Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH Zurich). 2023. 63 p.
9. Ivanov A.V., Salo M.A., Bondarchuk S.N., Kochkarina N.A. Impact of wildfire and windfall on phytocenosis of stone pine-broad-leaved forest (by the data of 60-years monitoring). *Siberian Journal of Forest Science*. 2020;(5):3–10 (in Russian). DOI: 10.15372/SJFS20200501.
10. Sidorenkov V.M., Avakov Yu.A., Sidorenkova E.M., Zhafyarov A.V., Stepanova S.K. Assessment of wildfires risk for the Bureya Nature reserve on the basis of the geoinformation analysis of regional features of the territory and natural complexes. *Forestry Information*. 2017;(4):102–110.
11. Savvinova A.N., Gavril'yeva T.N., Parfenova O.T., Filippova V.V., Tananaev N.I. Public perception of hydrological risks and flood damage mitigation practices in the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic: Ecology and Economy*. 2024;14(1): 103–115 (in Russian). DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-103-115.
12. De Luca P., Hillier J.K., Wilby R.L., Quinn N.W., Harrigan S. Extreme multi-basin flooding linked with extra-tropical cyclones. *Environmental Research Letters*. 2017;12(11):114009. DOI: 10.1088/1748-9326/aa868e.
13. Walker E., Mitchell D., Seviour W. The numerous approaches to tracking extratropical cyclones and the challenges they present. *Weather*. 2020;75(11):336–341. DOI: 10.1002/wea.3861.
14. Podnebesnykh N.V., Ippolitov I.I. Large-scale atmospheric circulation over Siberia at the end of XX and the beginning of XXI centuries: A comparison of data obtained on the basis of surface synoptic charts and the reanalysis. *Fundamental and Applied Climatology*. 2019;(2):34–44 (in Russian).
15. Murray R.J., Simmonds I. A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: development and operation of the scheme. *Australian Meteorological Magazine*. 1991;39:155–166.

16. Sinclair M.R. Objective identification of cyclones and their circulation intensity, and climatology. *Weather and Forecasting*. 1997;12(3):595–612. DOI: 10.1175/1520-0434(1997)012<0595:OIOCAT>2.0.CO;2.
17. Zhang X., Tang H., Zhang J., Walsh J.E., Roesler E.L., Hillman B., Ballinger T.J., Weijer W. Arctic cyclones have become more intense and longer-lived over the past seven decades. *Communications Earth & Environment*. 2023;4:348. DOI: 10.1038/s43247-023-01003-0.
18. Priestley M.D.K., Catto J.L. Future changes in the extratropical storm tracks and cyclone intensity, wind speed, and structure. *Weather & Climate Dynamics*. 2022;3(1):337–360. DOI: 10.5194/wcd-3-337-2022.
19. Climate of Yakutsk (Shver T.A., Izyumenko S.A., eds). Leningrad: Hydrometeoizdat; 1982:246 (in Russian).
20. Ignatyeva Yu.I., Tananaev N.I. Recurrence of cyclonic events over the Sakha Republic (Yakutia) in summer months. *Vestnik of North-Eastern Federal University Series "Earth Sciences"*. 2024;(2):46-53 (in Russian). DOI: 10.25587/2587-8751-2024-2-46-53.
21. Neu U., Akperov M.G., Bellenbaum N., Benestad R., Blender R., Caballero R., Coccozza A., Dacre H.F., Feng Y., Fraedrich K., Grieger J., Gulev S., Hanley J., Hewson T., Inatsu M., Keay K., Kew S.F., Kindem I., Leckebusch G.C., Liberato M.L.R., Lionello P., Mokhov I.I., Pinto J.G., Raible C.C., Reale M., Rudeva I., Schuster M., Simmonds I., Sinclair M., Sprenger M., Tilinina N.D., Trigo I.F., Ulbrich S., Ulbrich U., Wang X.L., Wernli H. IMILAST: a community effort to intercompare extratropical cyclone detection and tracking algorithms. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2013;94(4):529–547. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00154.1.
22. Gabysheva L.P., Protopopova V.V. The characteristic of inflammability of forests on the territory of the Republic of Sakha (Yakutia). *Izvestiya of the Samara RAS scientific center*. 2018;20(5):87–91 (in Russian).
23. Yanets P., Gadal S., Ivanova S. Modeling of the risk of forest fires in the Republic of Sakha (Yakutia) with GIS methods. *Advances in Current Natural Sciences*. 2019;(11):37–42.
24. Crawford A., Barber D., Dahl-Jensen D., et al. Hemisphere Extratropical Cyclone Tracks from ERA-5 [Data set]. 2020. CanWIN. DOI: 10.34992/ebnw-s681.
25. Crawford A., Schreiber E.A.P., Sommer N., Serreze M.C., Stroeve J.C., Barber D.G. Sensitivity of Northern Hemisphere cyclone detection and tracking results to fine spatial and temporal resolution using ERA5. *Monthly Weather Review*. 2021;149(8):2581–2598. DOI: 10.1175/MWR-D-20-0417.1.
26. Pohlert T. trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. R package version 1.1.5, <<https://CRAN.R-project.org/package=trend>>. 2023.
27. Roesch A., Schmidbauer H. WaveletComp: Computational Wavelet Analysis. R package version 1.1, <<https://CRAN.R-project.org/package=WaveletComp>>. 2018.
28. Churakova-Sidorova O.V., Siegwolf R.T.W., Fonti M.V., Vaganov E.A., Saurer M. Spring arctic oscillation as a trigger of summer drought in Siberian subarctic over the past 1494 years. *Scientific Reports*. 2021;11:19010. DOI: 10.1038/s41598-021-97911-2.
29. Shi C., Liang Y., Gao C., Wang Q., Shu L. Drought-modulated boreal forest fire occurrence and linkage with La Niña events in Altai Mountains, Northwest China. *Atmosphere*. 2020;11(9):956. DOI: 10.3390/atmos11090956.
30. Postnikova P.O., Parnikova S.P., Tananaev N.I., Parfenova O.T. Impact of climate change on the frequency and intensity of forest fires: perspectives, consequences and risks. *Economy and nature management in the North*. 2024;(1):56–62 (in Russian).

Сведения об авторах

ТАНАНАЕВ Никита Иванович – кандидат географических наук, заведующий лабораторией, доцент, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова; <https://orcid.org/0000-0003-2997-0169>, ResearcherID: J-3471-2012, Scopus Author ID: 12782200000, SPIN: 1859-8831, e-mail: tanni@svfu.ru

ИГНАТЬЕВА Юлиана Ивановна – магистрант, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.

ЗАХАРОВ Моисей Иванович – кандидат географических наук, PhD, доцент, старший научный сотрудник, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

About the authors

Nikita I. TANANAEV – Cand. Sci. (Geogr.), Laboratory Head, Associate Professor, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-2997-0169, ResearcherID: J-3471-2012, Scopus Author ID: 12782200000, SPIN: 1859-8831, e-mail: tanni@s-vfu.ru

Yuliana I. IGNATYEVA – Master's student, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

Moisey I. ZAKHAROV – Cand. Sci. (Geogr.), PhD, Associate Professor, Senior Researcher, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University Yakutsk, Russian Federation.

Вклад авторов

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Authors' contribution

All authors made equivalent contributions to the publication.

Конфликт интересов

Один из авторов – Тананаев Никита Иванович является членом редакционного совета журнала «Вестник СВФУ им. М.К. Аммосова. Серия «Науки о Земле». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

Conflict of interests

One of the authors – Nikita Ivanovich Tananaev – is a member of the Editorial Board of the journal “Vestnik of the North-Eastern Federal University. Earth Sciences”. The authors are unaware of any other potential conflict of interest related to this manuscript.

Поступила в редакцию / Submitted 07.08.2026

Поступила после рецензирования / Revised 28.08.2026

Принята к публикации / Accepted 21.09.2026