

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-4-25-45>

УДК 551.515.4

Грозовая активность и характеристика неустойчивости атмосферы по данным реанализа ERA5 над азиатской частью Арктического сектора России

О.Е. Нечепуренко^{1,2}, И.В. Кузевская¹, К.Н. Пустовалов^{1,2}, В.П. Горбатенко¹, К.А. Кравец¹

¹Национальный Исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия;

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

o.e.nechepurenko@gmail.com, irinakuzhevskaja@gmail.com, const.pv@yandex.ru, vpgor@tpu.ru, foreveryoungfox@mail.ru

Грозы в Арктическом секторе Российской Федерации являются ключевым индикатором климатических изменений, поскольку сигнализируют о повышении температуры в этом холодном регионе. В работе рассмотрена изменчивость числа дней с грозой за 2015–2021 гг. в азиатской части Арктического сектора Российской Федерации по данным наземных наблюдений. Стремительного роста числа дней с грозой по сравнению с климатическими данными не обнаружено, однако на некоторых станциях отмечается увеличение частоты проявления грозовой активности. Верификация значений индекса неустойчивости Total Totals, полученных по данным одноименного продукта реанализа ERA5 и аэрологического зондирования, критических отличий не показала. Наилучшее согласие демонстрирует станция Якутск (1,4 %); на станциях Туруханск и Ванавара процент несовпадения составил 3,1 и 3,5 % соответственно. Использование продукта «Total Totals» реанализа ERA5 в арктических регионах актуально для ретроспективного установления факта наличия гроз и их локализации на слабозаселенных территориях.

Ключевые слова: Арктика, число дней с грозой, верификация, Total Totals, радиозонд

Thunderstorm activity and characterization of atmospheric instability according to ERA5 reanalysis data over the Asian part of the Russian Arctic

O.E. Nechepurenko^{1,2}, I.V. Kuzhevskaja¹, K.N. Pustovalov^{1,2}, V.P. Gorbatenko¹, K.A. Kravets¹

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia;

²Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS

o.e.nechepurenko@gmail.com, irinakuzhevskaja@gmail.com, const.pv@yandex.ru, vpgor@tpu.ru, foreveryoungfox@mail.ru

Thunderstorms in the Arctic sector of the Russian Federation are a key indicator of climate change, as they signal a temperature rise in this cold region. The paper considers the variability of the number of days with thunderstorms in the Asian part of the Russian Arctic for 2015–2021 based on ground-based observations. No rapid increase in the number of days with thunderstorms as compared to the long-term data was found. However, an

increase in the frequency of thunderstorm activity is registered at some stations. A verification of the Total Totals instability index values obtained from the ERA5 reanalysis product with the same name and rawinsonde data did not show critical differences. The best fit was demonstrated for Yakutsk station (1.4 %); at Turukhansk and Vanavara stations, the percentage of inconsistency was 3.1 and 3.5 %, respectively. The use of the ERA5 Total Totals product in the Arctic regions is relevant for the retrospective determination of the presence of thunderstorms and their localization in sparsely populated areas.

Keywords: Arctic, number of days with thunderstorm, verification, Total Totals, rawinsonde

Введение

Климатические изменения ставятся во главу угла научных исследований в области гидрометеорологии, поскольку общая тенденция роста температуры воздуха по всему земному шару влечет серьезные перемены во всех сферах человеческой деятельности. Северные районы больше других реагируют на потепление [8, 22], включая ослабление статической устойчивости тропосферы в высокоширотной Арктике, что, вероятно, может привести к увеличению повторяемости явлений конвективного характера [16]. По данным Всемирной сети определения местоположения молний (WWLLN) количество арктических молний выше 65° с. ш. утроилось за последнее десятилетие [32]. Данные ежегодного отчета Vaisala [51] подтверждают возросшую грозовую активность над северными регионами с 2017 года.

В связи с этим исследование повторяемости конвективных явлений в арктическом секторе и условий развития конвекции в атмосфере для их образования являются актуальными задачами и требуют всестороннего изучения.

Несмотря на постоянное развитие современных оперативных систем численного прогнозирования погоды, опасные конвективные явления, к числу которых относят шквалы, град, смерчи, сильные ливни и грозы, когда они наблюдаются в комплексе с другими конвективными явлениями, сочетание которых образует ОЯ, остаются относительно плохо прогнозируемым явлением во временном масштабе более нескольких часов [23, 36]. Одним из широко практикуемых способов оценки атмосферной неустойчивости является использование индексов, первые из которых были разработаны в 40–50-х годах XX в. в качестве вспомогательного инструмента для оперативного прогноза погоды [44]. Применение индексов позволяет качественно и количественно оценивать степень устойчивости атмосферы. Другим назначением индексов является прогноз возникновения грозы и других опасных конвективных явлений, для чего рассчитанные значения индексов неустойчивости сравниваются с заранее определенным пороговым значением, характерным, например, для случая с грозой и без грозы для конкретного региона. Традиционно индексы рассчитывались на основе вертикальных профилей метеорологических величин, определяемых посредством аэрологического зондирования. К достоинству аэрологического

зондирования относится то, что контактные измерения параметров атмосферы отражают ее истинное состояние в фиксированный момент времени. Однако, недостатком такого вида наблюдения является малая частота запусков радиозонда (00 и 12 ч ВСВ), что не всегда хорошо согласуется с суточным пиком конвективной активности, а также неравномерное пространственное распределение пунктов наблюдения. Стоит отметить, что, согласно отчетам ЦАО [12], некоторая доля запланированных выпусков не реализуются.

Для эффективного использования индексов в прогнозе образования конвективных явлений для конкретного региона требуется определение пороговых значений для разных сезонов года [11]. Полный список индексов содержит десятки различных индексов неустойчивости, сочетающих термодинамические и/или кинематические параметры, используемые для прогноза гроз. Индексы с упрощенной формулой расчета: Lifted index [28], Showalter index [47], K-index [30], Total Totals index [41] и CAPE [20, 21, 25, 39, 45] в научных исследованиях наиболее «популярны». В конечном итоге индексы, рассчитанные по данным аэрологического зондирования, дают только числовые значения, которые характеризуют конвективный потенциал воздушной массы в районе аэрологической станции.

Преимуществом применения индексов неустойчивости является универсальность, поскольку с их помощью сравнивают параметры конвекции в разных по физико-географическим характеристикам регионах мира и изучают динамику и эволюцию погодных явлений, связанных с конвекцией. Стоит отметить, что индексы, приведенные в статье, не работают в горных районах, где высота поверхности находится выше уровня 850 гПа.

В настоящее время расчет индексов неустойчивости не ограничивается только использованием данных аэрологического зондирования. Современные спутниковые продукты (MODIS/Aqua, Terra [42], VIIRS/SuomiNPP, GIIRS/FY4 [26] и др.) содержат восстановленные значения индексов неустойчивости, которые наносятся на карту погоды в ГИС-средах с подходящим подложным изображением со спутника, а затем с их помощью локализуют границы грозовых ячеек на обширной территории. Много научных работ посвящено интерпретации результатов численного моделей прогноза (NWP) для локализации зон опасных конвективных явлений с использованием значений индексов неустойчивости [3, 5]; в современных NWP доступны все конвективные индексы [43].

Глобальный реанализ ERA5 предоставляет пространственно- и временно согласованные продукты с расчетными значениями индексов K-index, Total Totals и CAPE в узлах регулярной сетки по долготе и широте в виде 4D-массивов с разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ [24]. Для характеристики степени неустойчивости атмосферы умеренных широт более перспективными считаются индексы K-index и Total Totals [13]. Однако для их использования нужны предварительные исследования по верификации значений, рассчитанных на основе разных измерений. Эти закономерности важно

учитывать при анализе информации из реанализов [4]. Например, реанализы хорошо согласуются с данными радиозондовых измерений над США [29, 38] и Австралией [19]. Для Европы оценены базы данных реанализа ERA-Interim [48] и ERA5 [49] в сравнении с данными наземных наблюдений. Выдвинуто предположение, что ERA5 является одним из самых надежных доступных реанализов для исследования конвективной среды, в основном проводилось сопоставление данных предыдущей версии ERA5 реанализа ERA-Interim с данными аэрологического зондирования [46]. Было показано, что температура на высотах, направление и скорость ветра также хорошо согласуются между собой для координатных точек (Колпашево, Новосибирск и Томск) при использовании обоих источников вертикальных профилей метеовеличин. В исследовании [35] проверялась достоверность реанализа ERA5 на основе данных пяти аэрологических станций на территории Сибири, расположенных в радиусе 500 км от города Томска. Показана перспективность применения ERA5 для восстановления вертикальных профилей температуры и характеристик ветра в тропосфере. В целом, научные работы с прямым сравнением (верификацией) именно значений индексов неустойчивости, полученных из реанализа семейства ECMWF, с аэрологическими или спутниковыми наблюдениями, активно публикуются в последнее время [10, 17, 27, 52].

Всестороннее изучение климатических особенностей является одной из главных задач, поставленных в Стратегии развития Арктической зоны России и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года и Основах государственной политики России в Арктике. Территория исследования в настоящей статье характеризуется редкой сетью наблюдений, из-за чего многие конвективные явления невозможно зафиксировать, однако даже те немногие метеорологические и аэрологические станции, расположенные за Полярным кругом, предоставляют ценные сведения о состоянии атмосферы. Цель настоящего исследования заключается в оценке за 2018–2022 гг. соответствия значений индекса неустойчивости Total Totals, полученных по данным реанализа ERA5 и аэрологического зондирования в азиатской части Арктического сектора России.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе для изучения грозовой активности азиатской части Арктического сектора России выбрана территория, расположенная севернее 60° с. ш. и восточнее 70° в. д., на которой расположено 77 метеорологических и 23 аэрологических станции. Сформированы два массива данных – первый для исследования грозовой активности с 2015 по 2021 год и второй для верификации данных реанализа ERA5 за период с 2018 по 2022 год.

Для формирования первого массива по изучению грозовой активности были отобраны дни с грозой из базы данных восьмисрочных наблюдений

за атмосферными явлениями (АТМ8С) ВНИИГМИ-МЦД [2]. Дополнительно привлекались данные штормовых телеграмм WAREP за тот же временной период. Отбор проводился через запрос к базе WAREP, который содержал индекс станции и коды атмосферного явления 91 «гроза на станции» и 92 «гроза в окрестности». После исключения из списка строк с ошибочными записями наблюдений и с отсутствием дней с грозой, для изучения грозовой активности на территории исследования было отобрано 11 метеорологических станций (рис. 1, табл. 1).

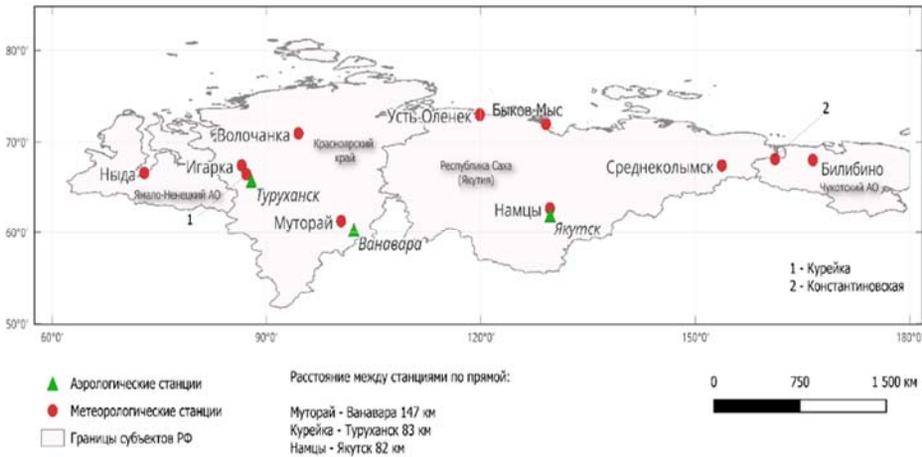


Рис. 1. Расположение выбранных для исследования аэрологических и метеорологических станций в азиатской части Арктического сектора РФ.

Fig. 1. Location of upper air and weather stations under study in the Asian part of the Russian Arctic.

Рассматриваемая в работе территория по классической классификации климатов Алисова относится к арктическому (станции Усть-Оленек, Быков Мыс и Константиновская), субарктическому поясу с очень холодной континентальной сибирской областью (станции Волоочанка, Курейка, Игарка, Муторай, Намцы, Среднеколымск и Билибино) и умеренному поясу с умеренно теплой областью атлантического влияния (станция Ныда). Кроме того, нужно отметить, что на исследуемой территории выделяется два региона, в которых принято анализировать циркуляционные процессы отдельно – до р. Енисей (~100° в. д.) и восточнее [1, 9].

Для верификации параметров неустойчивости из данных продуктов реанализа ERA5 был сформирован массив по следующим критериям: выбран период – с 1 мая по 30 сентября (теплый период); сроки – 00 и 12 ч ВСВ; отобраны метеорологические станции, расположенные на расстояние не более 150 км от пунктов проведения аэрологического зондирования (аэрологических станций) (табл. 1). Данное условие принимается исходя из того, что на такое расстояние радиозонд может удаляться от станции

по горизонтали. Заметим, что на севере отсутствуют метеорологические станции, на которых проводят, в том числе, и аэрологические наблюдения. Поэтому в итоге были сформированы такие пары «метеорологическая – аэрологическая станция»: Муторай – Ванавара, Курейка – Туруханск и Намцы – Якутск. Местное время для станций зондирования Туруханск и Ванавара отличается от ВСВ на 7 часов (сроки зондирования 7 и 19 часов), для Якутска – на 9 часов (запуск зонда осуществляется в 9 и 21 часов).

Таблица 1. Метаданные метеорологических и аэрологических станций в Арктическом секторе РФ

Table 1. Metadata of upper air and weather stations in the Asian part of the Russian Arctic

Субъект	Станция	Индекс ВМО	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Высота над у.м., м
Ямало- Ненецкий АО	Ныда	23345	66,63	72,93	10
Красноярский край	Волочанка	20982	70,97	94,5	37
	Игарка	23274	67,46	86,56	20
	Курейка	23375	66,47	87,22	27
	Муторай	24807	61,33	100,47	330
	Ванавара*	24908	60,33	102,26	259
	Туруханск*	23472	65,78	87,93	38
Республика Саха (Якутия)	Быков Мыс	21821	72,0	129,12	18
	Среднеколымск	25206	67,45	153,72	21
	Усть-Оленек	21711	73,0	119,87	21
	Намцы	24753	62,73	129,67	88
	Якутск*	24757	62,01	129,71	101
Чукотский АО	Билибино	25147	68,05	166,45	270
	Константиновская	25129	68,15	161,17	12

Примечание. * аэрологическая станция.

Для настоящего исследования был выбран индекс Total Totals (TOTL), так как в [13] было получено, что северная граница со значениями выше пороговых ($\geq 50^\circ\text{C}$), характеризующих атмосферу как сильно неустойчивую и указывающих на высокую вероятность возникновения гроз (более 75 %), простирается до 62° с. ш.:

$$TOTL = (T_{850} - T_{500}) + (TD_{850} - T_{500}), \quad (1)$$

где T_{500} – температура окружающей среды на уровне 500 гПа ($^\circ\text{C}$); T_{850} – температура окружающей среды на уровне 850 гПа ($^\circ\text{C}$); TD_{850} – температура точки росы на уровне 850 гПа ($^\circ\text{C}$).

По результатам аэрологического зондирования в архиве данных [50] выбраны значения индекса TOTL. Далее с портала Copernicus Climate Change Service были загружены данные продукта ERA5 «Total Totals» в формате NetCDF [31] за период с 2018–2022 гг. в сроки 00 и 12 ч ВСВ.

Для пакетной конвертации файлов реанализа ERA5 из формата NetCDF (.nc) в формат CSV (.csv) использован программный код (скрипт), написанный на языке программирования MATLAB (The MathWorks, Inc.). Отбор значений индекса TOTL для ближайших к аэрологическим станциям узлов сетки проведен с помощью скрипта на языке Python. В результате отбора сформирован массив данных значений индекса TOTL реанализа ERA5 из 866 случаев.

Анализ грозовой активности в азиатской части Арктического сектора России по наземным данным

Как известно, азиатская часть Арктического сектора РФ относится к районам со слабой грозовой активностью, обусловленной низкими температурами воздуха в теплое время года.

В этой части статьи рассмотрим изменчивость числа дней с грозой с 2015 по 2021 год. Потенциально грозовой период рассматриваемой территории начинается в мае и продолжается до сентября [14]. Отмечаются и аномалии, например, на станции Ныда наблюдался один день с грозой в первой декаде октября 2019 года.

Наибольшая грозовая активность для большинства станций приходится на июль (рис. 2), однако на отдельных станциях (ст. Ныда, Игарка) пик активности отмечается в августе. К августу образуется вертикальный теплообмен воздуха между хорошо прогретой подстилающей поверхностью и холодным воздухом с образованием мощной конвективной облачности. Отдельно стоит отметить самую северную станцию Усть-Оленек, на которой три дня с грозой были отмечены в третьей декаде июня 2020 года.

Суммарное за теплый период число дней с грозой с запада на восток в целом уменьшается (с 18 на станции Ныда до 3 на станции Константиновская). Минимальное число дней с грозой зафиксировано на станциях Курейка и Быков Мыс – 1 день за весь теплый период. Повышенная грозовая активность в районе Обской губы (ст. Ныда) и на берегу Игарской протоки Енисея (ст. Игарка) обусловлена выходами атлантических циклонов, которые стали чаще продвигаться на северное побережье Сибири [14], а также вследствие преобладания меридиональной формы циркуляции с начала XX века [9, 34]. Однако остается непонятным вопрос, почему в районе р. Енисей наблюдалось неравномерное и климатически необъяснимое распределение числа дней с грозой за семилетний период (севернее на станции Игарка наблюдалось 14 дней, тогда как на станции Курейка, расположенной на 174 км южнее, зарегистрирована одна гроза). Свыше десяти дней с грозой также наблюдалось на станциях Волочанка (11), Намцы (13), Муторай (17).

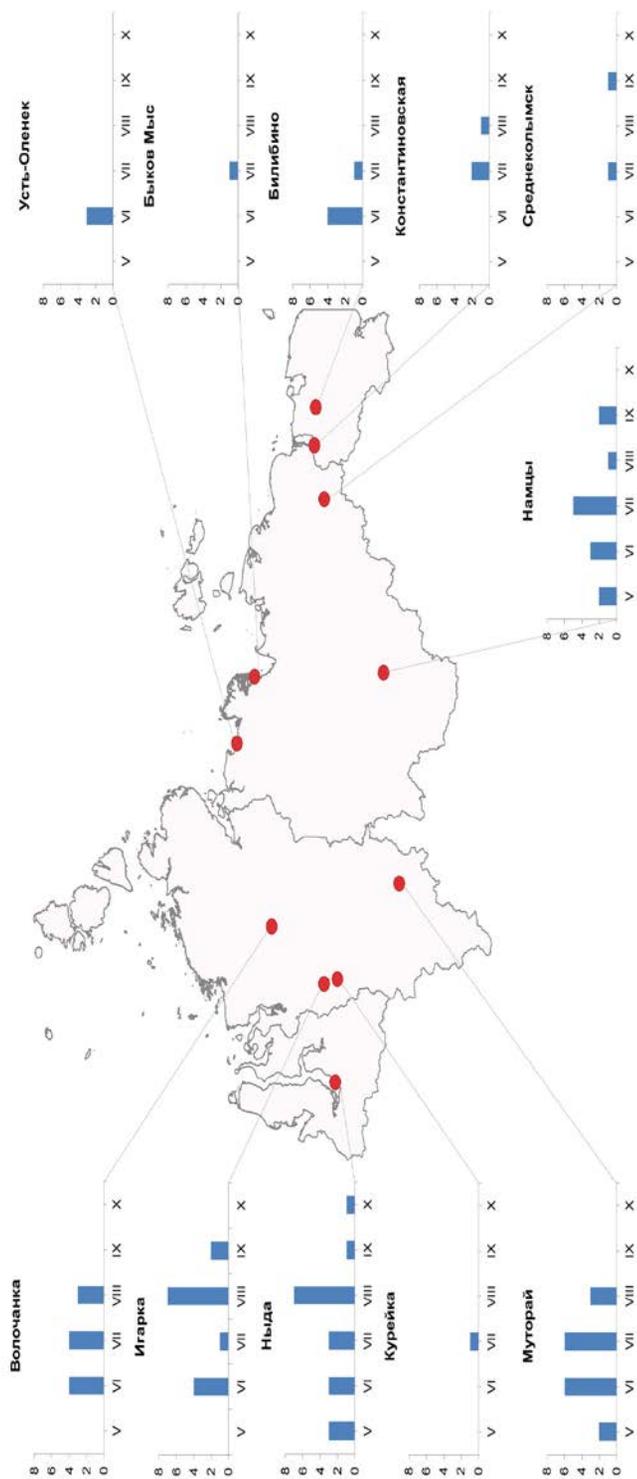


Рис. 2. Суммарное распределение гроз в азиатской части Арктического сектора РФ за период с 2015 по 2021 г.
 Fig. 2. Total distribution of thunderstorms in the Asian part of the Russian Arctic for 2015 to 2021.

Для прибрежных станций (Усть-Оленек, Быков Мыс) за рассмотренный период число дней с грозой не превысило 3. Процесс образования грозы здесь связан с таянием морских льдов и, как следствие, освобождением обширных водных пространств, и прогревом деятельного слоя на фоне увеличения температуры воздуха.

К середине теплого периода свободная ото льдов, относительно теплая поверхность моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря способствует формированию неустойчивой стратификации в атмосфере над арктическим побережьем, приводя к образованию мощных кучевых и кучево-дождевых облаков. На удаленных от Восточно-Сибирского моря станциях Среднеколымск, Константиновская, Билибино наблюдалось до 5 дней с грозой.

Как показано на рис. 3, годом с наиболее выраженной грозовой активностью можно считать 2020 г., общее число дней с грозой по всем станциям составило 22. Обновление максимума годового числа дней с грозой на рассматриваемых станциях в 2020 г. подтверждается данными Научно-прикладного справочника «Климат России» [14].

Косвенным свидетельством усиления грозовой активности являются лесные пожары на обширных незаселенных северных территориях Сибири. В [40] на основе данных дистанционного зондирования было отмечено, что 2019 и 2020 гг. выделялись как экстремальные по числу пожаров в сибирской Арктике. Кроме того, над площадью лесного пожара в атмосферу выделяется большое количество водяного пара [15] и создается слой аэрозольных частиц, что способствует разогреву нижележащих слоев воздуха и облегченной конденсации водяного пара (на ядрах конденсации пирогенного происхождения) и, как следствие, развитию конвективной облачности [33].

Добавим, что дымовая завеса является слоем, которая задерживает уходящее тепло от подстилающей поверхности, увеличивая тем самым ночные температуры воздуха [18]. Помимо того, очаги возгорания приводят к эманиции парниковых газов, таких как диоксид углерода и метан [6, 37], в большом количестве содержащихся в вечной мерзлоте. В результате складывается самоподдерживающийся триггерный процесс.

В целом, анализ динамики грозовой активности региона за последнее десятилетие в сравнении с многолетними данными показал, что на фоне наличия значительной межгодовой изменчивости грозовой активности повторяемость гроз на севере заметно увеличилась. Данные с северных метеостанции азиатской части России не демонстрируют стремительного роста числа дней с грозой по сравнению с климатическими данными, однако на некоторых станциях отмечается увеличение частоты проявления грозовой активности.

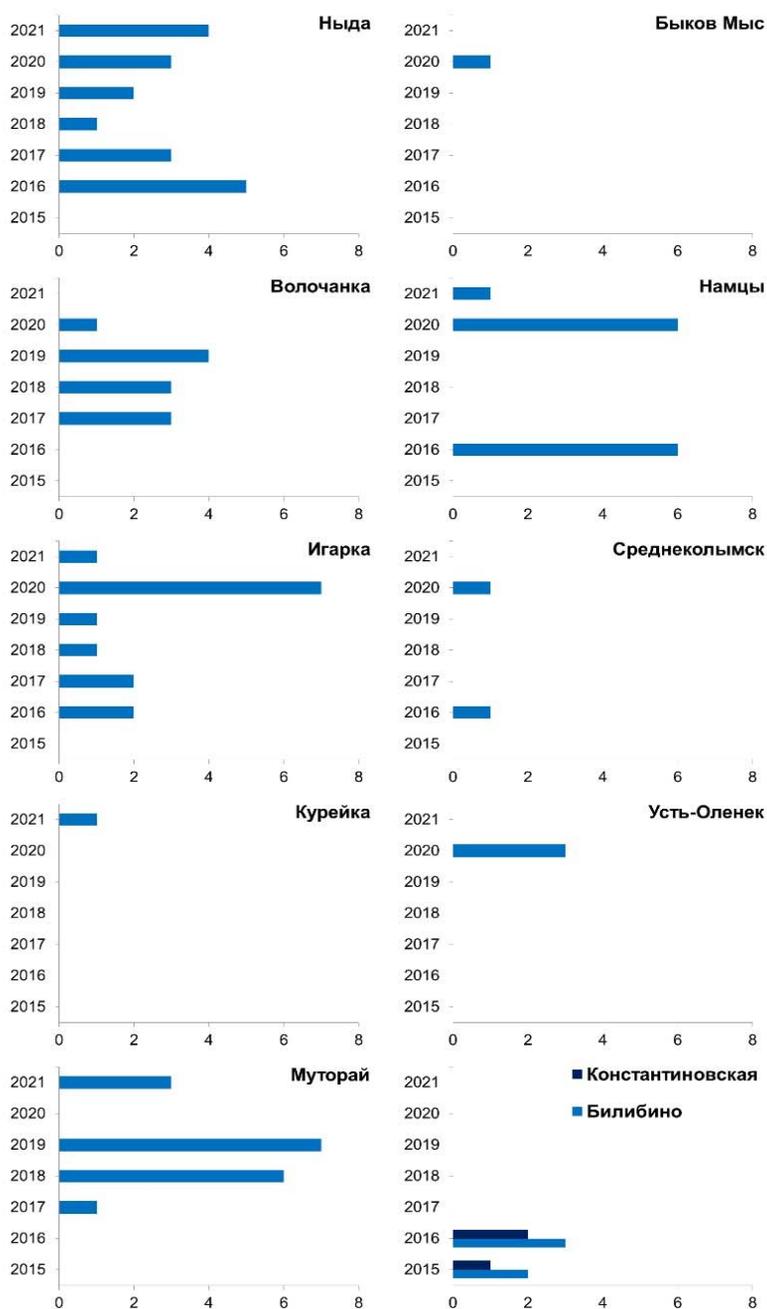


Рис. 3. Межгодовая изменчивость суммарного числа дней с грозой в году в азиатской части Арктического сектора РФ.

Fig. 3. Interannual variability of total number of days with thunderstorms per year in the Asian part of the Russian Arctic.

Верификация значений продукта «Total Totals» реанализа ERA5 с результатами аэрологического зондирования

Необходимость всестороннего изучения конвективных явлений возрастает, и применение индексов неустойчивости, особенно в рассматриваемом регионе, будет актуальным. Выбор индекса неустойчивости Total Totals обоснован выше. Для оценки соответствия его значений, полученных по данным реанализа ERA5 (ниже группа «ERA5») и аэрологического зондирования (группа «Аэрология») в азиатской части Арктического сектора России, был сформирован массив для трех исследуемых станций, расположенных в азиатской части Арктического сектора России. Из массива исключались отрицательные значения индекса, поскольку такие величины не несут физического смысла.

В качестве проверочного критерия на соответствие закона распределения использовался критерий Колмогорова – Смирнова. За нулевую принималась гипотеза об отсутствии различия анализируемого распределения с теоретически ожидаемым нормальным распределением. Для всех трех станций статистическая проверка об отсутствии различий была выполнена на критическом уровне $p > 0,05$. Таким образом, три выборки имеют нормальное распределение (рис. 4). Оценка на принадлежность одной генеральной совокупности проводилась с учетом соответствия средних и дисперсий (критериев Стьюдента и Фишера).

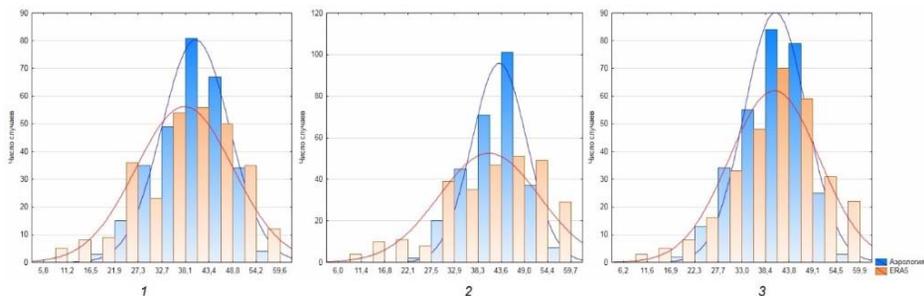


Рис. 4. Гистограммы нормального распределения для данных реанализа (синий) и аэрологических данных (оранжевый) для станций 1) Туруханск; 2) Ванавара; 3) Якутск.

Fig. 4. Normal distribution histograms for the reanalysis data (blue) and upper-air data (orange) for 1) Turukhansk; 2) Vanavara; 3) Yakutsk.

Для каждой станции по аэрологическим данным определен доверительный интервал, ограниченный $1,25\sigma$ (среднеквадратического отклонения, 75 %). Соответствие значения индекса TOTL продукта ERA5 границам этого интервала интерпретировалось как совпадение.

Получено, что критических отличий между верифицируемыми выборками не обнаружено. Сравнение в группах «Аэрология» и «ERA5» показало, что наибольшие различия получены на станции Ванавара (табл. 2):

за рассматриваемый период 3,5 % значений индекса TOTL по данным реанализа были значительно ниже аналогичных значений по данным аэрологического зондирования (9 событий). Наилучшее согласие двух выборок демонстрируют значения индекса на станции Якутск (1,4 %).

Таблица 2. Сравнение основных статистических показателей и процента несовпадения результатов по данным аэрологического зондирования и реанализа

Table 2. Comparison of basic statistics and percentage of discrepancy between upper-air sounding and reanalysis

Данные	Туруханск		Ванавара		Якутск	
	Аэро- логия	ERA5	Аэро- логия	ERA5	Аэро- логия	ERA5
Н наблюдений	288		283		295	
Среднее, ед.	40,2	37,7	43,0	40,7	40,5	40,2
СКО, ед.	7,7	11,0	6,3	11,5	7,0	10,2
Минимум, ед.	17	5,8	26,8	6,0	20,2	6,2
Максимум, ед.	56,7	59,6	58,0	59,7	58,0	59,9
Критерий Стьюдента	0,002		0,003		0,727	
Критерий Фишера	2,041		3,325		2,119	
Процент несовпадения, %	3,1		3,5		1,4	
BIAS, ед.	-2,6		-2,4		-0,4	
MAE, ед.	10,8		9,7		9,5	
RMSE, ед.	13,9		12,6		12,3	

Для оценки соответствия значений индекса TOTL, полученных по данным реанализа и аэрологических наблюдений, рассчитывались следующие показатели [7]:

1) BIAS – систематическая ошибка, представляющая систематическое завышение или занижение верифицируемого значения индекса (ERA5) относительно принятого за эталонный (аэрология):

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - E_i)$$

2) MAE – средняя абсолютная ошибка, характеризующая среднее значение погрешности без учета ее знака (с точностью до 0,1):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_i - E_i|$$

3) RMSE – средняя квадратическая ошибка, показывающая средне-квадратическое отклонение верифицируемой величины от эталонной:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - E_i)^2}$$

где N – число случаев; V_i – верифицируемое значение индекса (реанализ); E_i – эталонное значение (аэрология).

Систематическая погрешность BIAS значений TOTL по данным реанализа составила от -0,4 до -2,5 единиц. Значения MAE не превысили 11 единиц индекса. Оценка RMSE показала, что среднее отклонение реанализных значений TOTL от аэрологических лежат в пределах от 12,3 до 13,9. Значения индекса TOTL по ERA5 в 65–68 % случаев для всех рядов данных не отличались от аэрологических на ± 10 единиц.

Ввиду отсутствия плотной сети метеорологических, аэрологических, спутниковых наблюдений, а также выходных продуктов численного моделирования реанализ является единственным инструментом для исследования метеорологических особенностей арктических территорий. Из достоинств реанализа ERA5 стоит отметить его высокое пространственное и часовое временное разрешение. Однако не стоит забывать и о «сглаживании» и занижении значений в результате интерполяции полей метеовеличин, а также неспособности учитывать особенности рельефа или влияния процессов на разделе «суша ↔ вода».

Приведенные результаты исследования позволяют сделать вывод, что использование продукта реанализа ERA5 «Total Totals» в арктических регионах целесообразно для ретроспективного установления факта наличия гроз и их локализации на слабозаселенных территориях. Для точного установления грозовой деятельности на исследуемой территории необходимо определить пороговые значения индекса как границы вероятности развития грозы, что не входило в задачу данного исследования.

Заключение

Грозы в Арктическом секторе России являются одним из ключевых индикаторов климатических изменений, поскольку они сигнализируют о потеплении в этом холодном регионе. Соответственно, повышение точности прогноза возникновения гроз крайне актуально для северных регионов.

За семилетний период с 2015 по 2021 год выявлено, что в границах рассматриваемого региона грозовая активность чаще приходилась на районы Обской губы (ст. Ныда, 66,63° с. ш., 72,93° в.д.) и берег Игарской протоки Енисея (ст. Игарка, 67,46° с. ш., 86,56° в.д.), что обусловлено выходом на данную территорию южных циклонов. Активная грозовая деятельность для большинства станций наблюдалась в июле, на станциях Ныда и Волочанка пик приходился на август. В 2020 г. зафиксировано максимальное количество грозовых дней по всем станциям (22 дня), что подтверждается обновлением наибольшего числа дней в году с грозой на некоторых исследуемых станциях.

Верификация значений индекса неустойчивости Total Totals, полученных по данным реанализа ERA5 и измерений радиозонда, критических отличий не показала. На станции Якутск получено лучшее согласие двух выборок (1,4 %); на станциях Туруханск и Ванавара процент несовпадения составил 3,1 и 3,5 % соответственно.

В 65–68 % случаев для всех рядов значения индекса Total Totals по данным реанализа и аэрологического зондирования не отличались более чем на ± 10 единиц индекса.

Таким образом, применение продукта реанализа ERA5 «Total Totals» в арктических регионах является перспективным для констатации факта наличия развитых конвективных ячеек, способных продуцировать грозу, и определения наиболее вероятного местоположения молниевых разрядов. Определение пороговых значений индекса как границы вероятности развития грозы позволит использовать выбранный индекс для уточнения прогноза грозовой активности в азиатской части Арктического сектора России.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 22-27-00494, <https://www.rscf.ru/project/22-27-00494/>

Список литературы

1. Барашкова Н.К., Кужевская И.В., Поляков Д.В. Классификация форм атмосферной циркуляции: учеб. пособие. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2015. 124 с.
2. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Александрова Т.М., Коришнова Н.Н. Описание массива данных по атмосферным явлениям на метеорологических станциях России: Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620081. <http://meteo.ru/data/345-atmosfernye-yavleniya-sroki#описание-массива-данных>
3. Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А. Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 101-119.
4. ВМО-100. Руководство по климатологической практике. Женева: Изд-во ВМО, 2018. 168 с.
5. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 27-37.
6. Доклад Постоянной комиссии по экологическим правам Совета при Президенте Российской Федерации по развитию гражданского общества и правам человека «Зеленый поворот». М., 2020. 130 с.
7. Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Бундель А.Ю. Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов. М.: АМА ПРЕСС, 2021. 94 с.
8. Кравец К.А., Нечепуренко О.Е. Оценка грозовой активности выше 60° северной широты в РФ // ENVIROMIS 2022: Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды, Томск, 12-17 сентября 2022 года. Томск: Томский центр научно-технической информации, 2022. С. 10-13.
9. Мониторинг общей циркуляции атмосферы. Северное полушарие: Справочное пособие. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 124 с.

10. Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Пустовалов К.Н. Сопряженность положения грозových ячеек с высокими значениями индексов неустойчивости атмосферы на юго-востоке Западной Сибири // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции. 2020. С. 278-285.

11. Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Севастьянов В.В. Индексы неустойчивости атмосферы и их пороговые значения, оптимальные для прогноза гроз над Сибирью // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 44-59.

12. О работе аэрологической сети РФ в 2022 году. https://caontr.mipt.ru/monitor/stuff/upperair/upperair-rf2022_20231006.pdf

13. Пустовалов К.Н., Горбатенко В.П., Нагорский П.М., Нечепуренко О.Е. Пространственно-временная изменчивость конвективной неустойчивости на юге Западной Сибири по данным реанализа ERA5 // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2021. Т. 37, № 4. С. 203-215. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-203-215.

14. Разуваев В.Н., Булыгина О.Н., Коришнова Н.Н., Клеценко Л.К., Кузнецова В.Н., Трофименко Л.Т., Шерстюков А.Б., Швець Н.В., Давлетшин С.Г., Зверева Г.Н. Научно-прикладной справочник «Климат России»: свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2020621470. Рег. 18.08.2020.

15. Ситнов С.А., Мохов И.И. Содержание водяного пара в атмосфере над Европейской частью России в период летних пожаров 2010 г. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 4. С. 414-429.

16. Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И. Анализ изменений условий смерчегенеза в северной Евразии с использованием простого индекса конвективной неустойчивости атмосферы // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477, № 6. С. 722-727.

17. Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Спрыгин А.А., Ярынич Ю.И. Оценка конвективной неустойчивости атмосферы в случаях со шквалами, смерчами и крупным градом по данным спутниковых наблюдений и реанализа ERA5 // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35, № 6 (401). С. 429-435.

18. Шукуров К.А., Мохов И.И., Шукурова Л.М. Оценка радиационного форсинга дымового аэрозоля летних пожаров 2010 г. на основе измерений в московском регионе // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 3. С. 293-303.

19. Allen J.T., Karoly D.J. A climatology of Australian severe thunderstorm environments 1979-2011: Inter-annual variability and ENSO influence // Int. J. Climatol. 2014. Vol. 34. P. 81-97. DOI: 10.1002/joc.3667.

20. Brooks H.E., Anderson A., Riemann K., Ebberts I., Flachs H. Climatological aspects of convective parameters from the NCAR/NCEP Reanalysis // Atmos. Res. 2007. Vol. 83. P. 294-305.

21. Brooks H.E., Lee J.W., Craven J.P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data // Atmos. Res. 2003. P. 67-68, 73-94. DOI: 10.1016/S0169-8095(03)00045-0.

22. Brown D.M., Kochtubajda B., Said R.K. A Severe Thunderstorm Outbreak North of 70°N Over the Canadian Arctic Islands with Unusual Lightning Characteristics // Atmosphere-Ocean. 2020. Vol. 58, no. 4. P. 231-242.

23. Clark A.J., Gallus W.A., Xue M., Kong F. A Comparison of Precipitation Forecast Skill between Small Convection-Allowing and Large Convection-Parameterizing Ensembles // Weather Forecast. 2009. Vol. 24. P. 1121-1140. DOI:10.1175/2009WAF2222222.1.

24. *Copernicus Climate Change Service. Climate reanalysis.* <https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis>
25. *Doswell III C.A., Evans J.S.* Proximity sounding analysis for derechos and supercells: An assessment of similarities and differences // *Atmospheric Research.* 2003. P. 117-133. DOI: 10.1016/S0169-8095(03)00047-4.
26. *FENGYUN Satellite Data Center.* <https://satellite.nsmc.org.cn/>
27. *Fernando M., Millangoda M., Premalal S.* Analyze and Comparison of the Atmospheric Instability Using K-Index, Lifted Index, Total Totals Index, Convective Availability Potential Energy (CAPE) and Convective Inhibition (CIN) in Development of Thunderstorms in Sri Lanka During Second Inter-Monsoon // *Multi-Hazard Early Warning and Disaster Risks.* 2021. P. 603-614. DOI: 10.1007/978-3-030-73003-1_41
28. *Galway J.G.* The Lifted index as a predictor of latent instability // *Bulletin of the American Meteorological Society.* 1956. Vol. 3. P. 528-529.
29. *Gensini V.A., Mote T.L., Brooks H.E.* Severe-Thunderstorm Reanalysis Environments and Collocated Radiosonde Observations // *Meteorol. Climatol.* 2014. Vol. 53. P. 742-751. DOI: 10.1175/JAMC-D-13-0263.1.
30. *George J.J.* Weather forecasting for aeronautics. New York; London: Academic Press. 1960. 684 p.
31. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J.* The ERA5 global reanalysis // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020. Vol. 146 (730). P. 1999-2049.
32. *Holzworth R.H., Brundell J.B., McCarthy M.P., Jacobson A.R., Rodger C.J., Anderson T.S.* Lightning in the Arctic // *Geophysical Research Letters.* 2021. Vol. 48, no. 7. DOI: 10.1029/2020GL091366.
33. *Kharyutkina E., Pustovalov K., Moraru E., Nechepurenko O.* Analysis of spatio-temporal variability of lightning activity and wildfires in Western Siberia during 2016-2021 // *Atmosphere.* 2022. Vol. 13. P. 1-16. DOI: 10.3390/atmos13050669.
34. *Kononova N.K., Lupo A.R.* Changes in the Dynamics of the Northern Hemisphere Atmospheric Circulation and the Relationship to Surface Temperature in the 20th and 21st Centuries // *Atmosphere.* 2020. Vol. 11 (255). P. 1-14. DOI: 10.3390/atmos11030255.
35. *Kuchinskaia O., Bryukhanov I., Penzin M., Ni E., Doroshkevich A., Kostyukhin V., Samokhvalov I., Pustovalov K., Bordulev I., Bryukhanova V., Stykon A., Kirillov N., Zhivotenyuk I.* ERA5 Reanalysis for the Data Interpretation on Polarization Laser Sensing of High-Level Clouds // *Remote Sensing.* 2022. Vol. 15. P. 109. DOI: 10.3390/rs15010109.
36. *Kuzhevskaya I., Volkova M., Nechepurenko O., Chursin V.* A study of hailstorms in the south of Western Siberia // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference «Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development» – Hydrometeorological and Geodetic Research in the Building Area.* 2019. Vol. 698. P. 1-8. DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044036.
37. *Lenton T.M., Held H., Kriegler E., Hall J.* Tipping Elements in the Earth's Climate System // *PNAS.* 2008. Vol. 105 (6). P. 1786-1793. DOI: 10.1073/pnas.0705414105.
38. *Li F., Chavas D.R., Reed K.A., Dawson II D.T.* Climatology of Severe Local Storm Environments and Synoptic-Scale Features over North America in ERA5 Reanalysis and CAM6 Simulation // *J. Clim.* 2020. Vol. 33 (19). P. 8339-8365. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0986.1.

39. *Markowski P.M., Straka J.M., Rasmussen E.N.* Direct Surface Thermodynamic Observations within the Rear-Flank Downdrafts of Nontornadic and Tornadoic Supercells // *Monthly Weather Review*. 2002. Vol. 130. P. 1692-1721. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<1692:DSTOWT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<1692:DSTOWT>2.0.CO;2).
40. *McCarty J.L., Smith Thomas E.L., Turetsky M.R.* Arctic fires re-emerging // *Nature Geoscience*. 2020. Vol. 13. P. 658-660. DOI: 10.1038/s41561-020-00645-5.
41. *Miller R.C.* Notes on Analysis and Severe Storm Forecasting Procedures of the Air Force Global Weather Center // Tech. Report / Headquarters, Air Weather Service, USAF. 1972. 190 p.
42. *MODIS Atmospheric Profiles*. <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod07.php>
43. *Nguyen L., Rohrer M., Schwarb M., Stoffel M.* Development of a combined empirical index for a 5-day forecast of heavy precipitation over the Bernese Alps // *Environment International*. 2020. Vol. 135. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105357.
44. *Peppler R.A.* A review of static stability indices and related thermodynamic parameters // Illinois State Water Survey Division / Climate and meteorology section. Misc. Publ. 104. 1988. 87 p.
45. *Rasmussen E.N., Blanchard D.O.* A Baseline Climatology of Sounding-Derived Supercell and Tornado Forecast Parameters // *Wea. Forecast*. 1998. Vol. 13. P. 1148-1164. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<1148:ABCOSD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<1148:ABCOSD>2.0.CO;2).
46. *Samokhvalov I.V., Bryukhanov I.D., Park Soojin, Zhivotenyuk I.V., Ni E.V., Stykon A.P.* Optical characteristics of contrails according to polarization lidar sensing data // *Proc. SPIE 10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2018. 6 p. DOI: 10.1117/12.2504517.
47. *Showalter A.K.* A stability index for forecasting thunderstorms // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1947. Vol. 34. P. 250-252.
48. *Taszarek M., Brooks H.E., Czernecki B., Szuster P., Fortuniak K.* Climatological aspects of convective parameters over Europe: a comparison of ERA-Interim and sounding data // *J. Clim*. 2018. Vol. 31 (11). P. 4281-4308. DOI: 10.1175/JCLI-D-17-0596.1.
49. *Taszarek M., Pilguy N., Allen J.T., Gensini V., Brooks H.E., Szuster P.* Comparison of Convective Parameters Derived from ERA5 and MERRA-2 with Rawinsonde Data over Europe and North America // *J. Clim*. 2020. Vol. 34 (8). P. 3211-3237. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0484.1.
50. *University of Wyoming*. College of Engineering. Atmospheric Soundings. <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
51. *Vaisala Annual report 2021*. https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Vaisala_Annual%20report_2021_final.pdf
52. *Varga A.J., Breuer H.* Evaluation of convective parameters derived from pressure level and native ERA5 data and different resolution WRF climate simulations over Central Europe // *Clim. Dyn*. 2022. Vol. 58. P. 1569-1585. DOI: 10.1007/s00382-021-05979-3.

References

1. *Barashkova N.K., Kuzhevskaja I.V., Poljakov D.V.* Klassifikacija form atmosfernoj cirkuljacii. Tomsk: Pub. Tom. un-ta, 2015, 124 p. [in Russ.].
2. *Bulygina O.N., Veselov V.M., Aleksandrova T.M., Korshunova N.N.* Opisanie massiva dannyh po atmosferynym javlenijam na meteorologicheskikh stancijah Rossii.

Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh № 2015620081. Available at: <http://meteo.ru/data/345-atmosferynye-yavleniya-sroki#opisanie-massiva-dannyh> [in Russ.].

3. Bykov A.V., Vetrov A.L., Kalinin N.A. The forecast of dangerous convective phenomena in the Perm Krai with use of global prognostic models. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 363, pp. 101-119 [in Russ.].

4. *VMO-100*. Rukovodstvo po klimatologicheskoy praktike. 2018, Geneva, 168 p. [in Russ.].

5. Gubenko I.M., Rubinshtein K.G. Analysis of the results of thunderstorm forecasting based on atmospheric instability indices using the WRF-ARW numerical model data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, pp. 16-24. DOI:10.3103/S1068373915010033

6. Doklad Postojannoj komissii po jekologicheskim pravam Soveta pri Prezidente Rossijskoj Federacii po razvitiju grazhdanskogo obshhestva i pravam cheloveka. Moscow, 2020, 128 p. [in Russ.].

7. Kiktev D.B., Murav'ev A.V., Bundel' A.Ju. Metodicheskie rekomendacii po verifikacii meteorologicheskikh prognozov. Moscow, AMA PRESS publ., 2021, 94 p. [in Russ.].

8. Kravec K.A., Nechepurenko O.E. Ocenka grozovoj aktivnosti vyshe 60° Severnoj shirotы v RF [Assessment of thunderstorm activity above 60° North latitude in the Russian Federation]. *ENVIROMIS 2022: Mezhdunarodnaja konferencija i shkola molodyh uchenyh po izmerenijam, modelirovaniju i informacionnym sistemam dlja izuchenija okruzhajushhej srede*, Tomsk, 12-17 sentjabrja 2022 goda. Tomsk: Tomskij centr nauchno-tehnicheskoy informacii, 2022, pp. 10-13 [in Russ.].

9. Monitoring obshhej cirkuljacii atmosfery. Severnoe polusharie. Obninsk, FGBU «VNIIGMI-MCD», 2012, 124 p. [in Russ.].

10. Nechepurenko O.E., Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A., Pustovalov K.N. Sopryazhennost' polozhenija grozovyh jacheek s vysokimi znachenijami indeksov neustojchivosti atmosfery na jugo-vostoke Zapadnoj Sibiri [Conjugation of the position of thunderstorm cells with high values of atmospheric instability indices in the southeast of Western Siberia]. V sbornike: *Sovremennye tendencii i perspektivy razvitija gidrometeorologii v Rossii. Materialy III Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. 2020, pp. 278-285 [in Russ.].

11. Nechepurenko O.E., Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A., Sevast'janov V.V. Indices of atmospheric instability and their threshold values, optimal for forecasting thunderstorms over Siberia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2018, vol. 368, no. 2, pp. 44-59 [in Russ.].

12. O rabote ajerologicheskoy seti RF v 2022 godu. https://caontr.mipt.ru/monitor/stuff/upperair/upperair-rf2022_20231006.pdf [in Russ.].

13. Pustovalov K.N., Gorbatenko V.P., Nagorskij P.M., Nechepurenko O.E. Spatiotemporal variability of convective instability in the south of Western Siberia according to ERA5 reanalysis data. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki [Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences]*, 2021, vol. 37, no. 4, pp. 203-215. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-203-215 [in Russ.].

14. Razuvaev V.N., Bulygina O.N., Korshunova N.N., Kleshhenko L.K., Kuznecova V.N., Trofimenko L.T., Sherstjukov A.B., Shvec' N.V., Davletshin S.G., Zvereva G.N. Nauchno-prikladnoj spravochnik «Klimat Rossii» [in Russ.].

15. Sitnov S.A., Mohov I.I. Water-Vapor Content in the Atmosphere over European Russia during the 2010 Summer Fire. *Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana* [*Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*], 2013, vol. 49, no. 4, pp. 414 [in Russ.].

16. Chernokul'skij A.V., Kurganskij M.V., Mohov I.I. Analiz izmenenij uslovij smerchegeneza v severnoj Evrazii s ispol'zovaniem prostogo indeksa konvektivnoj neustojchivosti atmosfery. *Doklady Akademii nauk*, 2017, vol. 477, no. 6, pp. 722-727 [in Russ.].

17. Shihov A.N., Chernokul'skij A.V., Sprygin A.A., Jarynich Ju.I. Assessment of convective instability of the atmosphere in cases of squalls, tornadoes and large hail based on satellite observations and ERA5 reanalysis. *Optika atmosfery i okeana* [*Atmospheric and Oceanic Optics*], 2022, vol. 35, no. 6, pp. 429-435 [in Russ.].

18. Shukurov K.A., Mohov I.I., Shukurova L.M. Assessment of radiation forcing of smoke aerosol from summer fires in 2010 based on measurements in the Moscow region. *Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana* [*Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*], 2014, vol. 50, no. 3, pp. 293 [in Russ.].

19. Allen J.T., Karoly D.J. A climatology of Australian severe thunderstorm environments 1979-2011: Inter-annual variability and ENSO influence. *Int. J. Climatol.*, 2014, vol. 34, pp. 81-97. DOI: 10.1002/joc.3667.

20. Brooks H.E., Anderson A., Riemann K., Ebbers I., Flachs H. Climatological aspects of convective parameters from the NCAR/NCEP Reanalysis. *Atmos. Res.*, 2007, vol. 83, pp. 294-305.

21. Brooks H.E., Lee J.W., Craven J.P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. *Atmos. Res.*, 2003, pp. 67-68, 73-94. DOI: 10.1016/S0169-8095(03)00045-0.

22. Brown D.M., Kochtubajda B., Said R.K. A Severe Thunderstorm Outbreak North of 70°N Over the Canadian Arctic Islands with Unusual Lightning Characteristics. *Atmosphere-Ocean*, 2020, vol. 58, no. 4, pp. 231-242.

23. Clark A.J., Gallus W.A., Xue M., Kong F. A Comparison of Precipitation Forecast Skill between Small Convection-Allowing and Large Convection-Parameterizing Ensembles. *Weather Forecast*, 2009, vol. 24, pp. 1121-1140. DOI:10.1175/2009WAF2222222.1.

24. Copernicus Climate Change Service. *Climate reanalysis*. <https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis>

25. Doswell III C.A., Evans J.S. Proximity sounding analysis for derechos and supercells: An assessment of similarities and differences. *Atmospheric Research*, 2003, pp. 117-133. DOI: 10.1016/S0169-8095(03)00047-4.

26. FENGYUN Satellite Data Center. <https://satellite.nsmc.org.cn/>

27. Fernando M., Millangoda M., Premalal S. Analyze and Comparison of the Atmospheric Instability Using K-Index, Lifted Index, Total Totals Index, Convective Availability Potential Energy (CAPE) and Convective Inhibition (CIN) in Development of Thunderstorms in Sri Lanka During Second Inter-Monsoon. *Multi-Hazard Early Warning and Disaster Risks*, 2021, pp. 603-614. DOI: 10.1007/978-3-030-73003-1_41

28. Galway J.G. The Lifted index as a predictor of latent instability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1956, vol. 3, pp. 528-529.

29. Gensini V.A., Mote T.L., Brooks H.E. Severe-Thunderstorm Reanalysis Environments and Collocated Radiosonde Observations. *Meteorol. Climatol.*, 2014, vol. 53, pp. 742-751. DOI: 10.1175/JAMC-D-13-0263.1.

30. George J.J. Weather forecasting for aeronautics. New York; London: Academic Press publ., 1960, 684 p.

31. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, no. 730. pp. 1999-2049.

32. Holzworth R.H., Brundell J.B., McCarthy M.P., Jacobson A.R., Rodger C.J., Anderson T.S. Lightning in the Arctic. *Geophysical Research Letters*, 2021, vol. 48, no. 7. DOI: 10.1029/2020GL091366.

33. Kharyutkina E., Pustovalov K., Moraru E., Nechepurenko O. Analysis of spatio-temporal variability of lightning activity and wildfires in Western Siberia during 2016-2021. *Atmosphere*, 2022, vol. 13, pp. 1-16. DOI: 10.3390/atmos13050669.

34. Kononova N.K., Lupo A.R. Changes in the Dynamics of the Northern Hemisphere Atmospheric Circulation and the Relationship to Surface Temperature in the 20th and 21st Centuries. *Atmosphere*, 2020, vol. 11 (255), pp. 1-14. DOI: 10.3390/atmos11030255.

35. Kuchinskaiia O., Bryukhanov I., Penzin M., Ni E., Doroshkevich A., Kostyukhin V., Samokhvalov I., Pustovalov K., Bordulev I., Bryukhanova V., Stykon A., Kirillov N., Zhivotenyuk I. ERA5 Reanalysis for the Data Interpretation on Polarization Laser Sensing of High-Level Clouds. *Remote Sensing*. 2022, vol. 15, pp. 109. DOI: 10.3390/rs15010109.

36. Kuzhevskaiia I., Volkova M., Nechepurenko O., Chursin V. A study of hailstorms in the south of Western Siberia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference «Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development». Hydrometeorological and Geodetic Research in the Building Area. 2019, vol. 698, pp. 1-8. DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044036.

37. Lenton T.M., Held H., Kriegler E., Hall J. Tipping Elements in the Earth's Climate System. *PNAS*. 2008, vol. 105, pp. 1786-1793. DOI: 10.1073/pnas.0705414105.

38. Li F., Chavas D.R., Reed K.A., Dawson II D.T. Climatology of Severe Local Storm Environments and Synoptic-Scale Features over North America in ERA5 Reanalysis and CAM6 Simulation. *J. Clim.*, 2020, vol. 33, pp. 8339-8365. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0986.1.

39. Markowski P.M., Straka J.M., Rasmussen E.N. Direct Surface Thermodynamic Observations within the Rear-Flank Downdrafts of Nontornadic and Tornadoic Supercells. *Monthly Weather Review*, 2002, vol. 130, pp. 1692-1721. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2002\)130<1692:DSTOWT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<1692:DSTOWT>2.0.CO;2).

40. McCarty J.L., Smith Thomas E.L., Turetsky M.R. Arctic fires re-emerging. *Nature Geoscience*. 2020, vol. 13, pp. 658-660. DOI: 10.1038/s41561-020-00645-5.

41. Miller R.C. Notes on Analysis and Severe Storm Forecasting Procedures of the Air Force Global Weather Center. Tech. Report. *Headquarters, Air Weather Service, USAF*. 1972. 190 p.

42. MODIS Atmospheric Profiles.
<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod07.php>

43. Nguyen L., Rohrer M., Schwarb M., Stoffel M. Development of a combined empirical index for a 5-day forecast of heavy precipitation over the Bernese Alps. *Environment International*. 2020, vol. 135. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105357.

44. Pepler R.A. A review of static stability indices and related thermodynamic parameters. *Illinois State Water Survey Division. Climate and meteorology section*. Misc. Publ., 104, 1988, 87 p.

45. Rasmussen E.N., Blanchard D.O. A Baseline Climatology of Sounding-Derived Supercell and Tornado Forecast Parameters. *Weather and Forecasting*, 1998, vol. 13,

pp. 1148-1164. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<1148:ABCOSD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<1148:ABCOSD>2.0.CO;2).

46. Samokhvalov I.V., Bryukhanov I.D., Park Soojin, Zhivotenyuk I.V., Ni E.V., Stykon A.P. Optical characteristics of contrails according to polarization lidar sensing data. Proc. SPIE 10833, 24th *International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2018, 6 p. DOI: 10.1117/12.2504517.

47. Showalter A.K. A stability index for forecasting thunderstorms. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1947, vol. 34, pp. 250-252.

48. Taszarek M., Brooks H.E., Czernecki B., Szuster P., Fortuniak K. Climatological aspects of convective parameters over Europe: a comparison of ERA-Interim and sounding data. *J. Clim.*, 2018, vol. 31, pp. 4281-4308. DOI: 10.1175/JCLI-D-17-0596.1.

49. Taszarek M., Pilguy N., Allen J.T., Gensini V., Brooks H.E., Szuster P. Comparison of Convective Parameters Derived from ERA5 and MERRA-2 with Rawinsonde Data over Europe and North America. *J. Clim.*, 2020, vol. 34, pp. 3211-3237. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0484.1.

50. *University of Wyoming. College of Engineering. Atmospheric Soundings.* <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

51. *Vaisala Annual report 2021.* https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Vaisala_Annual%20report_2021_final.pdf

52. Varga A.J., Breuer H. Evaluation of convective parameters derived from pressure level and native ERA5 data and different resolution WRF climate simulations over Central Europe. *Clim. Dyn.*, 2022, vol. 58, pp. 1569-1585. DOI: 10.1007/s00382-021-05979-3.

Поступила 03.07.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023;
принята в печать 12.12.2023.

Submitted 03.07.2023; approved after reviewing 23.11.2023;
accepted for publication 12.12.2023.