

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 551.515/4
doi: 10.17223/25421379/25/8

ГРОВОВАЯ АКТИВНОСТЬ НАД ЗАПАДНОЙ СИБИРЬЮ

Ольга Евгеньевна Нечепуренко¹, Валентина Петровна Горбатенко²,
Константин Николаевич Пустовалов³, Анастасия Витальевна Громова⁴



^{1, 2, 3, 4} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

^{1, 3} Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

¹ o.e.nechepurenko@gmail.com

² vpgor@tpu.ru

³ const.pv@yandex.ru

⁴ gromovaav@inbox.ru

Аннотация. Плотность разрядов молний над территорией Западной Сибири по данным WWLLN характеризуется пространственной неоднородностью с выделением пяти основных очагов. Молниевая активность за период с 2016–2020 гг. на юге Западной Сибири наблюдалась с мая по сентябрь с максимумом разрядов в июле (38,3 %) и минимумом в сентябре (2,5 %). Получена статистически значимая взаимосвязь между полями с критическими значениями индекса неустойчивости K-index и очагами высокой плотности разрядов молний.

Ключевые слова: молния, гроза, плотность молний, индексы неустойчивости

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

Для цитирования: Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Пустовалов К.Н., Громова А.В. Грозовая активность над Западной Сибирью // Геосферные исследования. 2022. № 4. С. 123–134. doi: 10.17223/25421379/25/8

Original article
doi: 10.17223/25421379/25/8

LIGHTNING ACTIVITY OVER WESTERN SIBERIA

Olga E. Nechepurenko¹, Valentina P. Gorbatenko², Konstantin N. Pustovalov³,
Anastasia V. Gromova⁴

^{1, 2, 3, 4} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

^{1, 3} Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

¹ o.e.nechepurenko@gmail.com

² vpgor@tpu.ru

³ const.pv@yandex.ru

⁴ gromovaav@inbox.ru

Abstract. Given the various consequences associated with thunderstorms, accurate forecasts of the time and location of thunderstorms can potentially have a wide range of benefits for industries such as industry, energy, transportation, agriculture, etc.

In recent decades, in some regions of Russia, visual and aural methods of thunderstorm observation have been supplemented with instrumental monitoring (ground-based lightning detection systems). Global lightning systems include the World Wide Lightning Location Network (WWLLN), which detects electrical discharges such as cloud-to-ground and cloud-to-cloud with a 24-hour recording of the time and coordinates of lightning discharges.

The aim is a spatio-temporal analysis of lightning discharge density distribution over the territory of Western Siberia using the WWLLN data and comparison of high-density centers with the fields of K-index values.

Based on WWLLN data, the number of lightning discharges was calculated for a grid with $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ cells by longitude and latitude for the areas of 50–64N and 60–95E for the period 2016–2020. The area of each cell was then calculated, and the density of lightning discharges ρ was calculated [discharge/(km²×year)]. Analysis of temporal variability (multi-year and seasonal) of lightning activity was carried out both for the whole territory under study and for individual settlements. Calculation of lightning density was carried out for 5 km radius zones in the center of each settlement.

K-Index ERA5 reanalysis product was used to estimate the degree of atmospheric instability; reanalysis data processing and visualization were performed in the MATLAB mathematical package using the author's script.

Five regions with an average annual lightning density exceeding the values of the neighboring regions by a factor of three were singled out within the investigated area. These regions are located over Kondinsky lowland ($\rho_{\max} \sim 1,4$ discharge/(km²×year)), Sredneobskaya lowland, Ob-Irtysh interfluvies ($\rho_{\max} \sim 1$ discharge/(km²×year)), the eastern periphery of the Southern Urals and the northwestern periphery of the Altai-Sayan mountain country ($\rho_{\max} \sim 0,8$ discharge/(km²×year)).

The following lightning discharge densities were recorded for the largest settlements in Western Siberia's central and southern regions: Khanty-Mansiysk (0.76 discharge/(km²×year)) had the highest value, while Kyzyl city (0.08 discharge/(km²×year)) had the lowest. The average lightning discharge density across all sites was 0.25 discharge/(km²×year).

The basic intensity of lightning activity falls in June-August (about 88 %). Even during this period, the number of lightning strikes in neighboring territories can vary by four or more times.

The spatial location of the band of increased thunderstorm activity is generally consistent with the location of the northern periphery of the zone with average KIND values $\geq 30^\circ$.

Keywords: lightning, thunderstorm, lightning density, instability indices

Source of financing: this research is supported by Russian Science Foundation (project # 22-27-00494, <https://www.rscf.ru/project/22-27-00494/>).

For citation: Nechepurenko O.E., Gorbatenko V.P., Pustovalov K.N., Gromova A.V. (2022) Lightning activity over Western Siberia. *Geosferyne issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 123–134. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/25/8

Введение

Грозы оказывают широкий диапазон воздействия на природную и антропогенную среду. Молнии, формирующиеся между облаком и землей («Облако–Земля»), приводят к гибели людей и повреждению производственной и социальной инфраструктур [Говорушко, 2011; Андрианова и др., 2020], а также к возникновению таких опасных явлений, как лесные пожары [Барановский, 2019; Schultz et al, 2019; Кожекар, Баранецкий, 2021; Kharyutkina et al, 2022]. В перечень опасных проявлений конвективной деятельности, к которым относятся грозы, входят и экстремальные осадки, ветры, град и торнадо [Аджиев, Кулиев, 2018; Прокофьева, Осипова, 2020; Чернокульский и др., 2022]. Учитывая разнообразные последствия, связанные с грозами, точные прогнозы времени и места грозы потенциально могут иметь широкий спектр преимуществ для таких отраслей, как промышленность, энергетика, транспорт, сельское хозяйство и др. [Dowdy, 2016].

Для выбора грозозащитных мероприятий необходимо знать конкретную величину, характеризующую грозовую деятельность в данной местности. Интенсивность грозовой деятельности в данном районе земной поверхности определяется числом ударов (разрядов) молнии в год, приходящихся на 1 км² земной поверхности – плотность разрядов молний (ρ). Такая информация может быть получена только при наличии многолетних непрерывных фиксирований разрядов молний автоматическими грозопеленгаторами. Грозопеленгаторы разрабатываются с 1980-х гг., но даже к сегодняшнему дню ими оснащены далеко не все территории. В России грозопеленгационными системами (ГПС) покрыта

только европейская территория, для Западной Сибири регистрация гроз проводилась фрагментарно и, как правило, в течение короткого временного периода [Горбатенко, Ершова, 2011; Беликова и др., 2018; Тарабукина, Козлов, Иннокентьев, 2021]. При отсутствии результатов грозопеленгации, в практике выбора молниезащитных мероприятий, грозовая активность определяется средним многолетним значением суммы числа грозовых часов или грозовых дней в году. Однако основным ограничением такого метода является разреженная сеть метеорологических наблюдений (станций), что не позволяет составить карту пространственного распределения молниевой активности с высоким пространственным разрешением, которая будет использоваться для выбора рационального уровня молниезащиты.

В последние десятилетия в некоторых регионах России визуально-слуховые методы наблюдения за грозами, проводимые на метеорологических станциях, дополняются инструментальным мониторингом [Аджиев и др. 2017; Аджиев и др., 2018]. Регистрация электромагнитного излучения от молниевых разрядов осуществляется с помощью наземных ГПС. Среди наземных ГПС существуют глобальные и региональные сети, базирующиеся на разных методах регистрации электромагнитного излучения молниевых разрядов [Беликова и др., 2018]. К глобальным ГПС относят Всемирную сеть локализации молниевых разрядов (World Wide Lightning Location Network, WWLLN) [Rodger et al., 2014], которая осуществляет регистрацию электрических разрядов типа «Облако–Земля» (Cloud-to-Ground) и «Облако–Облако» (Cloud-to-Cloud) с круглосуточной фиксацией момента времени и координат молниевых разрядов [Dowden, Brundell, Rodger, 2002]. Сеть

WWLLN дает информацию о грозовой активности над всем земным шаром посредством регистрации электромагнитных сигналов от гроз в ОНЧ-диапазоне (3–30 кГц). В настоящее время сеть включает 70 датчиков [WWLLN, 2022], в том числе четыре датчика расположены на территории России (г. Якутск, г. Горно-Алтайск, с. Паратунка и г. Владивосток), находящихся на парных расстояниях от нескольких сотен метров до 10 тыс. км. Для локализации разряда молнии необходимо не менее пяти приемных станций. Согласно [Virts et al., 2013], грозопеленгационная сеть WWLLN обеспечивает возможность локализации молниевых разрядов в глобальном масштабе с высоким пространственным разрешением и позволяет получить оценки пространственно-временной изменчивости грозовой активности для любого региона планеты.

Целью настоящего исследования является пространственно-временной анализ распределения плотности разрядов молний над территорией Западной Сибири по данным WWLLN и сопоставление очагов высокой плотности с полями значений индексов неустойчивости атмосферы, практикуемыми в методах прогноза грозы.

Материалы и методы исследования

Для настоящей работы используется архив данных WWLLN, накопленный за период 2016–2020 гг. Оперативные данные WWLLN выкладываются в открытом доступе с задержкой 6 ч на сайте World Wide Lightning Location Network в формате KMZ (Google Earth) [WWLLN, 2022] и включают момент времени отдельного разряда с точностью до микро-секунды и его координаты [Клещева, Поталова, Пермяков, 2021]. Для удобства файлы в формате разрешения KMZ конвертируются в формат TXT с помощью ГИС-программ, после чего проводится их пакетная обработка с помощью языка программирования MATLAB.

На основе данных о координатах разрядов молний, зарегистрированных сетью WWLLN, рассчитывается количество разрядов молний для сетки с ячейками $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ по долготе и широте для территории Западной Сибири ($50\text{--}64^\circ$ с.ш., $60\text{--}95^\circ$ в.д.) за период 2016–2020 гг. Затем определяется площадь каждой ячейки, а на ее основе рассчитывается плотность разрядов молний ρ [разр./($\text{км}^2 \times \text{год}$)]. Также проводится анализ временной изменчивости (много-летней и сезонной) грозовой активности над исследуемой территорией. Расчет плотности молний для населенных пунктов осуществляется для зон радиусом 5 км от географического центра каждого пункта. Такой радиус был определен на основе среднего

значения площади населенных пунктов, расположенных на исследуемой территории; методика позволяет увеличивать или уменьшать радиус для уточнения значений плотности молний для крупных и малых пунктов соответственно. Заметим, что эффективность обнаружения удара молнии сетью WWLLN зависит от тока молнии, в среднем $\sim 30\%$ от всех разрядов [Mallick et al., 2014].

Площади ячеек расчетной сетки и расстояния между разрядами молний и центрами населенных пунктов рассчитывались с помощью функций `areaquad` и `distance` для среды программирования MATLAB, входящих в специализированные пакеты расширения Mapping Toolbox и Antenna Toolbox (The MathWorks, Inc) соответственно.

Функция `areaquad` позволяет рассчитать площадь широтно-долготного четырехугольника на поверхности Земли по данным граничных значений широты ($\varphi_{\min}$, $\varphi_{\max}$) и долготы ($\lambda_{\min}$, $\lambda_{\max}$) при заданном опорном эллипсоиде (reference ellipsoid, RE):

$$\text{areaquad}(\varphi_{\min}, \lambda_{\min}, \varphi_{\max}, \lambda_{\max}, \text{RE}). \quad (1)$$

Функция `distance` позволяет рассчитать расстояние и азимут между двумя пунктами на поверхности Земли на основе их координат (φ_1 , λ_1 и φ_2 , λ_2 для первого и второго пункта соответственно) при заданном опорном эллипсоиде:

$$\text{distance}(\varphi_1, \lambda_1, \varphi_2, \lambda_2, \text{RE}). \quad (2)$$

В качестве опорного эллипсоида в расчетах использовался эллипсоид, определенный всемирной системой геодезических параметров Земли 1984 г. (WGS 84).

Площадь окружностей (S) в центре населенных пунктов рассчитывалась по формуле:

$$S = \pi \times R^2, \quad (3)$$

где R – радиус окружности в километрах; π – число пи.

Для оценки степени атмосферной неустойчивости используются данные за летние месяцы 1990–2019 гг. продукта реанализа ERA5: K-Index (далее – KIND), полученный с сервера Copernicus Climate Change Service [Copernicus, 2022]. Обработка и визуализация данных реанализа проводятся в математическом пакете MATLAB с использованием авторского скрипта. В слагаемые индекса заложено определение статической неустойчивости в слое от 1,5 (850 гПа) до 5,5 км (500 гПа), влажности на уровне 850 гПа и дефицита воздушной массы на уровне 700 гПа (3 км), т.е. значение индекса зависит от толщины влажностнеустойчиво стратифицированных слоев.

Реанализ ERA5 создан Европейским центром среднесрочных прогнозов (ECMWF) и является пятым поколением реанализа глобальных атмосферных наблюдений ECMWF [Taszarek et al., 2020]. Примене-

ние данных реанализа ERA5 обусловлено рядом его достоинств: непрерывными рядами надежных данных за период более 40 лет (с 1979 г. по настоящее время), высоким пространственным разрешением ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$) и частым шагом по времени (1 ч).

Результаты и обсуждение

Согласно табл. 1, в целом над югом Западной Сибири плотность разрядов молний по данным WWLLN в среднем равна $0,25$ разр./км²×год и, как правило, изменяется в диапазоне $0,1 \div 0,5$ разр./(км²×год). При этом максимальное значение ρ составляет около $1,5$ разр./км²×год. В целом изменчивость ρ над данной территорией исследования (значений в ячейках

$0,1^\circ \times 0,1^\circ$) можно аппроксимировать гамма-распределением (рис. 1).

Исследование пространственной изменчивости плотности разрядов молний по данным WWLLN показало, что над исследуемым регионом наблюдалась зона повышенной плотности молний с увеличением значений ρ от юго-востока на северо-запад. В пределах этой области выделены пять регионов со среднемноголетней плотностью молний, превышающей значения плотности соседних регионов в два и более раза (рис. 2). Эти регионы расположены над Кондинской низменностью, Среднеобской низменностью, Обь-Иртышским междуречьем, восточной периферией Южного Урала и над северо-западной периферией Алтайско-Саянской горной страны.

Таблица 1
Основные статистические характеристики изменчивости плотности разрядов молний ρ , разр./(км²×год)

Table 1
Main statistical characteristics of lightning discharge density variability ρ , discharge/(km²×year)

Среднее	Медиана	СКО	Min	5-процентиль	25-процентиль	75-процентиль	95-процентиль	Max
0,25	0,23	0,13	0,003	0,08	0,16	0,32	0,49	1,44

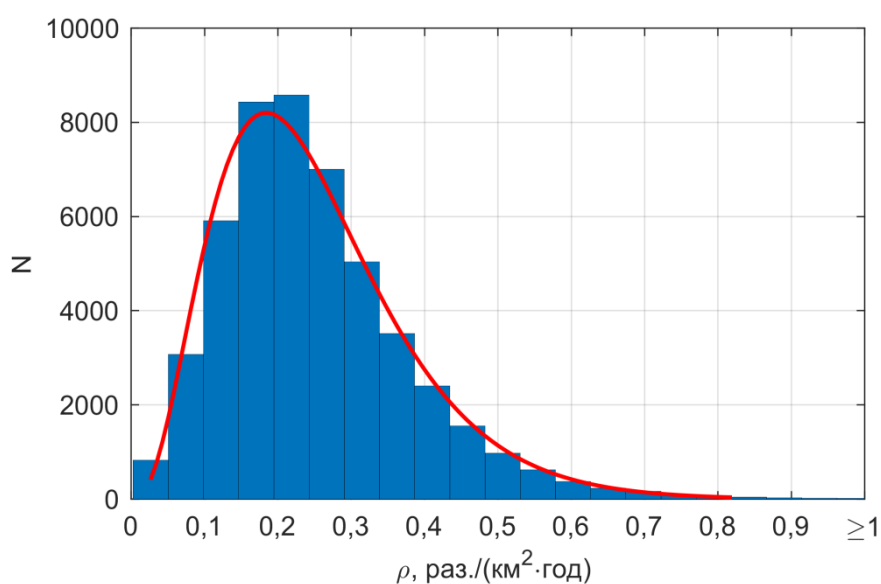


Рис. 1. Распределение значений ρ и их аппроксимация гамма-распределением

Fig. 1. Distribution of ρ values and their approximation by the gamma distribution

Самая высокая плотность молниевых разрядов наблюдалась в северной части Кондинской низменности ($\rho_{\max} \sim 1,4$ разр./(км²×год)) на юго-западной периферии Сибирских увалов. Вероятно, на увеличение плотности молниевых разрядов влияют географический (северная часть этого очага располагается на системе возвышенностей) и термодинамические факторы (южная часть имеет сильную заболо-

ченность и включает в себя крупную систему небольших озер).

Очаги над Среднеобской низменностью и Обь-Иртышским междуречьем ($\rho_{\max} \sim 1$ разр./(км²×год)), предположительно, обусловлены влиянием болотных комплексов [Горбатенко и др., 2020]. Расположение «Обь-Иртышского» очага хорошо согласуется с очертаниями Большого Васюганского болота – одного из

крупнейших болот в мире. Последние два центра повышенной молниевой активности выделяются, главным образом, по причине орографии – предгорий ($\rho_{\max} \sim 0,9$ разр./($\text{км}^2 \times \text{год}$)), и Алтайско-Саянской горной страны ($\rho_{\max} \sim 0,8$ разр./($\text{км}^2 \times \text{год}$)) соответственно. Аналогичные результаты были получены в работе [Kharyutkina et al., 2022].

Молниевая активность на территории юга Западной Сибири в основном наблюдалась с мая по сентябрь (рис. 3), где максимальная повторяемость молниевых разрядов приходится на июль (38,3 %), а минимальная – на сентябрь (2,5 %). При этом грозовая активность над регионом начиналась во второй половине апреля, с окончанием в октябре, но в сумме за эти два месяца плотность разрядов молний не превысила 1 %. Такое сезонное распределение плотности молний имеет значимую корреляцию с визуальными наблюдениями за числом дней с грозой и продолжительностью гроз [Горбатенко, Ершова, 2011].

Поскольку грозопоражаемости территорий присуща неоднородность пространственного распределения, для крупнейших населенных пунктов цен-

тральной и южной частей Западной Сибири была оценена плотность разрядов молний (рис. 4). Максимальное значение плотности отмечалось в Ханты-Мансийске (0,76 разр./($\text{км}^2 \times \text{год}$)), минимум получен для г. Кызыл (0,08 разр./($\text{км}^2 \times \text{год}$)). В целом по всем пунктам среднее значение плотности разрядов молнии составляет 0,25 разр./($\text{км}^2 \times \text{год}$). Плотность разрядов молний выше среднего, помимо г. Ханты-Мансийск, также зарегистрирована в городах Нижневартовск, Тобольск, Кедровый, Томск, Новокузнецк, Барнаул и Горно-Алтайск. Высокие значения плотности разрядов молнии (выше 3,0 разр./($\text{км}^2 \times \text{год}$)) для окрестностей Ханты-Мансийска были также получены и по результатам оптической регистрации молний спутником Micro-lab-1 за период 1995–1999 гг. [Konstantinova, Gorbatenko, Polyakov, 2017]. Следовательно, эти результаты не подлежат сомнению, и на территории высоких широт (выше 60° с.ш.) могут быть территории, на которых применяемый уровень молниезащиты должен быть выше, чем над другими территориями Западной Сибири.

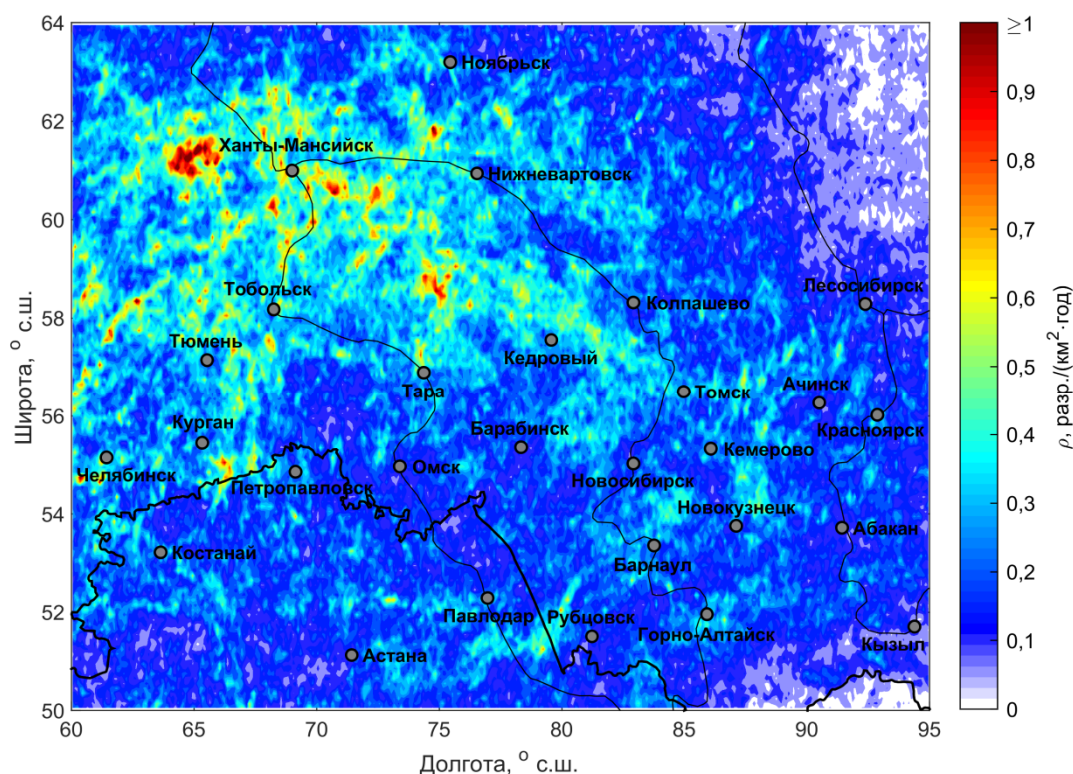


Рис. 2. Пространственное распределение плотности разрядов молний ρ , разр./($\text{км}^2 \times \text{год}$) на юге Западной Сибири по данным грозопеленгационной сети WWLLN за период 2016–2020 гг.

Fig. 2. Spatial distribution of lightning discharge density ρ , discharge/($\text{km}^2 \times \text{year}$) in the south of Western Siberia by the WWLLN for the period 2016–2020

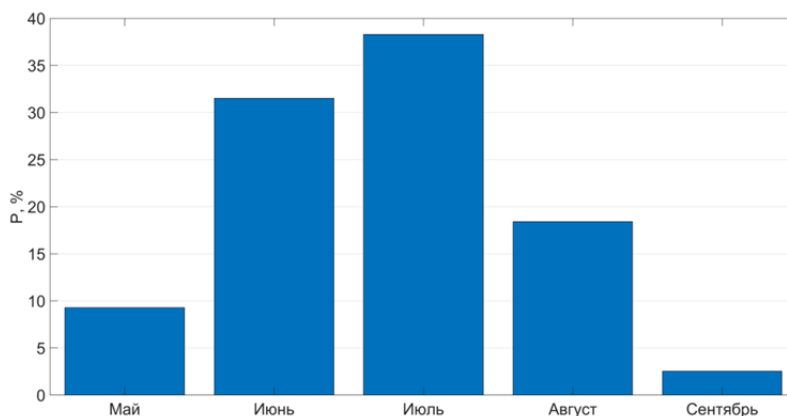


Рис. 3. Сезонное распределение повторяемости молниевых разрядов для всей территории исследования за 2016–2020 гг., %

Fig. 3. Seasonal distribution of lightning frequency for the entire study area for 2016–2020, %

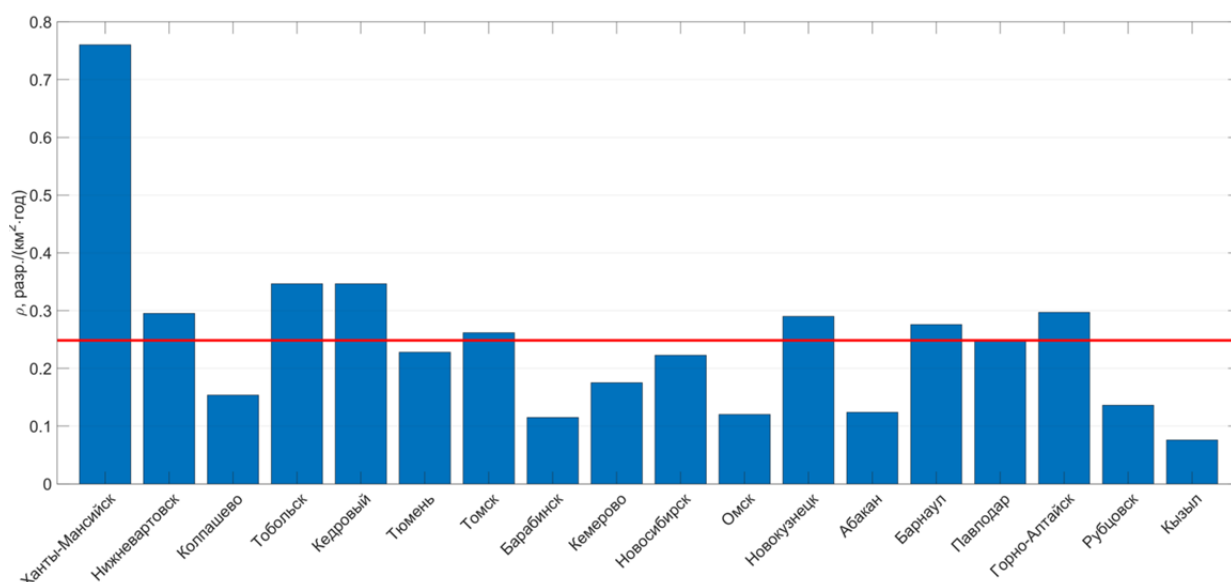


Рис. 4. Плотность разрядов молний p , разр./(км²×год) для крупных населенных пунктов юга Западной Сибири по данным WWLLN за период 2016–2020 гг. Красная горизонтальная линия соответствует среднеарифметическому значению по анализируемым населенным пунктам

Fig. 4. Title Density of lightning discharges p , discharge/(km²×year) for large settlements in the south of Western Siberia according to WWLLN data for the period 2016–2020. The red horizontal line corresponds to the mean value for the analyzed settlements

Для практических целей необходимо определить временные периоды максимальной повторяемости молниевых разрядов и продолжительность грозового сезона в районах населенных пунктов с развитыми отраслями промышленности. Эти характеристики для Западной Сибири могут существенно отличаться от средних величин, рассчитанных еще в прошлом столетии [Архипова, 1957].

Была проанализирована сезонная повторяемость молниевых разрядов за период, когда наиболее бла-

гоприятно развитие грозовой деятельности (апрель–октябрь). Максимальная повторяемость молниевых разрядов во всех населенных пунктах приходилась на июль (более 50 %), в октябре случаев с грозами не было зафиксировано. При этом грозовая активность над регионом начиналась во второй половине апреля, а заканчивалась в сентябре, в сумме за эти два месяца плотность разрядов молний не превышала 1 % от годовой. Сравнение продолжительности грозовой активности в различных частях территории

исследования показало ее существенное отличие. Например, в Ханты-Мансийске грозовая активность, как правило, отмечается на протяжении 6 месяцев (апрель–сентябрь), а в Омске – 4 месяцев (май–август).

Межгодовые вариации грозовой активности (рис. 5) оценивались через суммарное годовое количество грозовых разрядов (N) с разделением исследуемого региона на северную, центральную и южную зоны.

Анализируя данные, представленные на рис. 5, можно заметить, что существует и межгодовая и пространственная неоднородности молниевой активности. Значения плотности разрядов молнии могут различаться в отдельные годы более чем в 4 раза.

При этом зоны с повышенной молниевой активностью расположены в умеренных широтах ($55\text{--}65^\circ$ с.ш.). Оба этих фактора, в первую очередь, обусловлены спецификой синоптических процессов в разные годы, но на величину высоких значений молниевой активности оказывают влияние и местные особенности, увеличивающие конвективный потенциал атмосферы. Заметим, что пространственные неоднородности конвективных характеристик атмосферы Западной Сибири изложены в ряде работ [Горбатенко и др., 2020; Nechepurenko et al., 2020; Пустовалов и др., 2021], и сравнение их с пространственными особенностями плотности разрядов молнии представляет собой актуальную задачу.

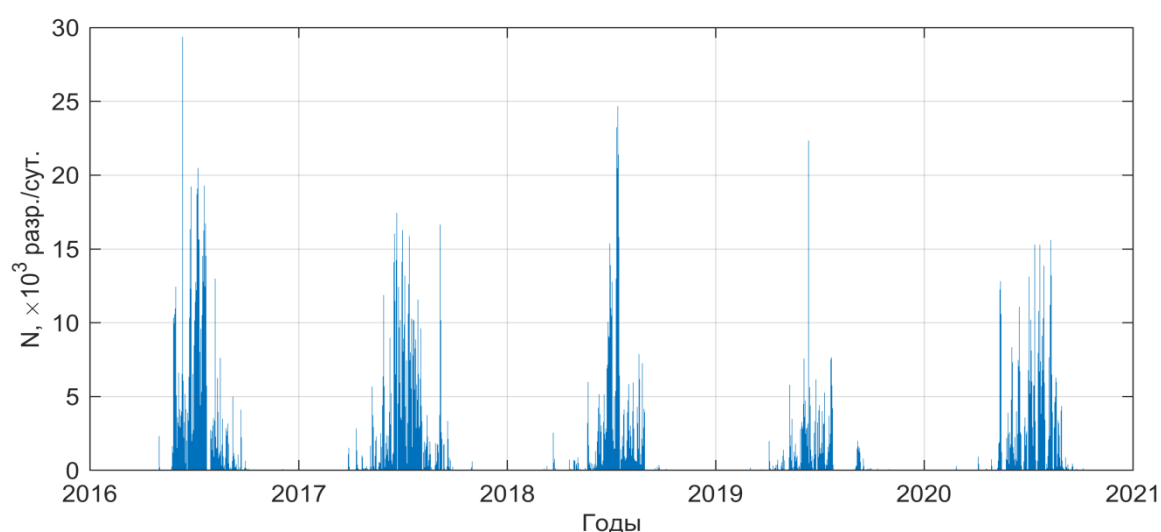


Рис. 5. Изменение грозовой активности (N , разр./сут.) над югом Западной Сибири по данным WWLLN за период 2016–2020 гг. Примечание: данные за август 2019 г. отсутствуют по техническим причинам

Fig. 5. Variation of thunderstorm activity (N , discharge/day) over the southern part of Western Siberia according to WWLLN data for the period 2016–2020. Note: Data for August 2019 is not available for technical reasons

Соотношение плотности молниевых разрядов и термодинамических индексов неустойчивости

В настоящее время в глобальные и региональные климатические модели, широко применяемые во всем мире для прогноза уровня развития конвекции, увеличения точности обнаружения зон конвекции и уменьшения вероятности ложного обнаружения гроз, вводятся параметризации молниевой активности, которые связывают частоту разрядов молний с характеристиками конвективной облачности. Многие исследования были направлены на поиск соотношения между параметрами молнии (например, частотой, полярностью) с опасными явлениями, связанными с конвективными облаками

[Sfica et al., 2015; Eliseev et al., 2019; Utsav et al., 2022], результаты которых могут быть использованы для улучшения прогнозов конвективных явлений, особенно на территориях, где нет сети метеорологических радаров и (или) систем обнаружения молний.

В целях повышения точности прогнозирования конвективных опасных явлений была изучена пространственная корреляция полей атмосферной неустойчивости над юго-востоком Западной Сибири и картой плотности разрядов молний. Оценка атмосферной неустойчивости основана на средней пространственной модели KIND [George, 1960] по данным реанализа ERA5 в срок 9:00 BCB (16:00 местного времени) за период с 1990 по 2019 г. Для Запад-

ной Сибири высокая вероятность развития грозы (до 90 %) определяется значением индекса неустойчивости атмосферы KIND, превышающего порог в 30 [Нечепуренко и др., 2018].

На рис. 6 приведены средние значения индекса неустойчивости KIND, рассчитанные по его значениям в летние месяцы 1990–2019 гг., равным и превышающим 75-й процентиль (верхний квартиль повторяемости).

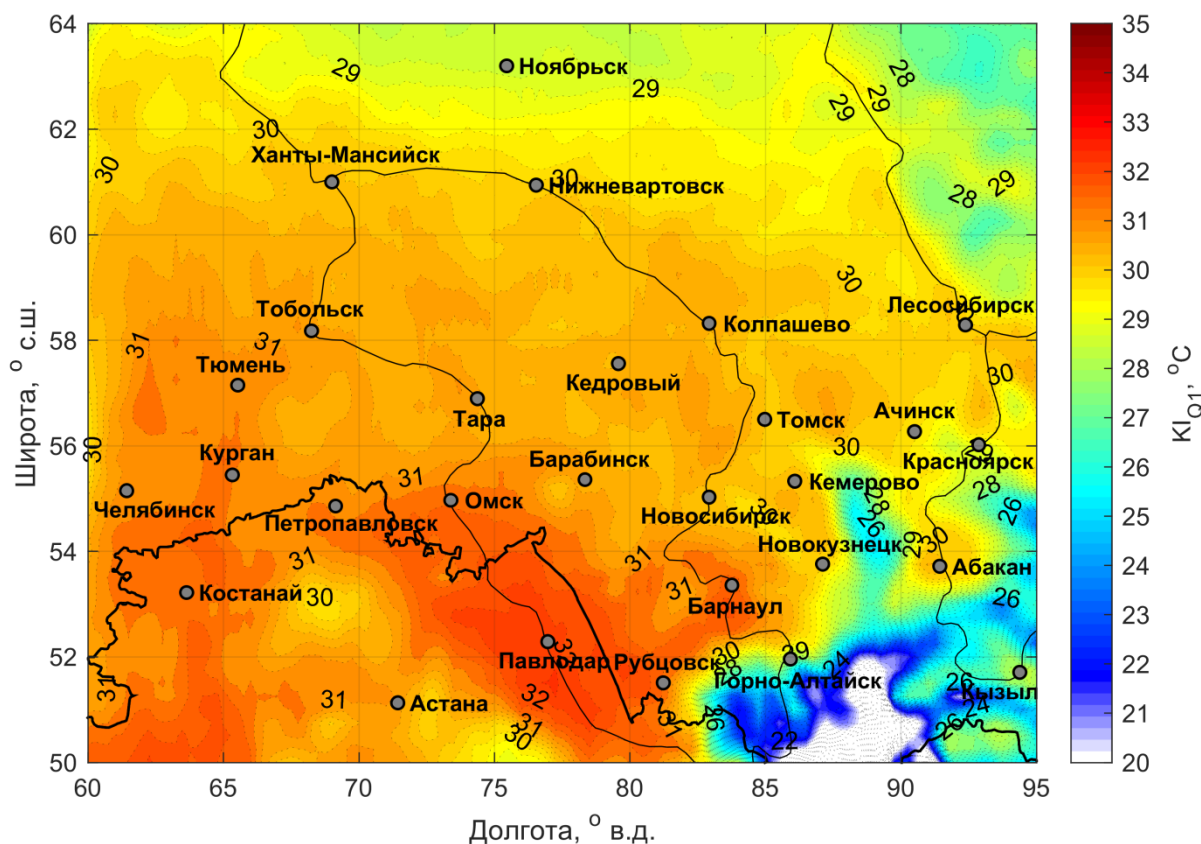


Рис. 6. Средние значения индекса неустойчивости KIND в срок 9:00 ВСВ, рассчитанные по значениям, равным и превышающим 75-й процентиль

Fig. 6. Mean values of the KIND at 9 UTC calculated from values equal to and greater than the 75th percentile

Совместный анализ пространственной изменчивости плотности разрядов молний и среднесезонных значений KIND в условиях повышенной конвективной неустойчивости ($KIND \geq 75$ -процентиля) показал следующее. Полоса с высокой плотностью разрядов молний приходится, главным образом, на северную периферию зоны со средними значениями $KIND \geq 30^\circ$, которые, согласно работе [Нечепуренко и др., 2018], соответствуют вероятности грозы около 75 % для территории Сибири. Исключениями являются лишь предгорные очаги (Зауралье и Алтайское предгорье), для которых характерны более высокие средние значения KIND (31° и более). При этом зона с максимальными значениями KIND (32° и более), приходящаяся на приграничные районы России и Казахстана, характеризуется относительно слабой грозовой активностью. Данная особенность может быть объяснена как циркуляционными факторами,

так и региональными особенностями этой территории, в частности малой степенью обеспеченности территории влагой, необходимой для развития конвекции. Районы пониженных значений KIND и плотности разрядов молний в целом согласуются и приходятся на центральные части горных массивов (в частности, Алтайских гор и Среднесибирского плоскогорья).

Заключение

В результате проведенных исследований получены оценки пространственного и сезонного распределения плотности разрядов молний над югом Западной Сибири на основе данных WWLLN за период с 2016 по 2020 г.

Отмечено, что плотности разрядов молний при- суща пространственная неоднородность и можно

выделить пять основных очагов, формируемых над Кондинской низменностью ($\rho_{\max} \sim 1,4$ разр./ $(\text{км}^2 \times \text{год})$), Среднеобской низменностью, Обь-Иртышским междуречьем ($\rho_{\max} \sim 1$ разр./ $(\text{км}^2 \times \text{год})$), восточной периферией Южного Урала и северо-западной периферией Алтайско-Саянской горной страны ($\rho_{\max} \sim 0,8$ разр./ $(\text{км}^2 \times \text{год})$).

Наибольшая грозовая активность среди крупнейших населенных пунктов в исследуемом регионе отмечается в г. Ханты-Мансийск ($0,76$ разр./ $(\text{км}^2 \times \text{год})$), минимальное значение плотности получено для г. Кызыл ($0,08$ разр./ $(\text{км}^2 \times \text{год})$). Средние для территории Западной Сибири за пятилетний период значения молниевой активности составляют $0,25$ разр./ $(\text{км}^2 \times \text{год})$. Высокие значения плотности разрядов молнии для окрестностей Ханты-Мансийска были получены и по результатам спутниковой регистрации молний за период 1995–1999 гг. [Konstantinova, Gorbatenko, Polyakov, 2017].

Основная интенсивность грозовой деятельности приходится на июнь–август (около 88 %). Отметим, что количество молний даже в этот период на соседних территориях может отличаться в 4 раза и более.

Пространственное расположение полосы повышенной грозовой активности в целом согласуется с расположением северной периферии зоны со средними значениями $KIND \geq 30^\circ$. Однако зона максимума $KIND$, приходящаяся на хорошо прогреваемые, но засушливые районы, характеризуется относительно слабой грозовой активностью. Следовательно, значения этого индекса могут быть использованы в прогнозе гроз над Западной Сибирью, однако необходимо учитывать региональные особенности территории.

В условиях меняющегося климата и увеличения конвективных характеристик атмосферы, промышленным предприятиям необходимо более осторожно подходить к выбору молниезащиты объектов.

Список источников

- Аджиев А.Х., Кулиев Д.Д. Характеристики грозовой активности и параметры молниевых разрядов на территории юга европейской части России // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54, № 4. С. 437–445.
- Аджиев А.Х., Кулиев Д.Д., Аджиева А.А., Куповых Г.В., Тумгоева Х.А. Определение параметров молниевых разрядов с использованием грозорегистратора LS 8000 // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2018. № 3. С. 55–63.
- Аджиев А.Х., Куповых Г.В., Андриевская В.Ю., Юрченко Н.В., Кудринская Т.В., Редин А.А. Мониторинг характеристик грозовой активности на юге европейской части России // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 4. С. 212–223.
- Андреанова Л. П., Кабашов В.Ю., Ахметшин А.Т., Атнагулов Д.Т. Инфраструктура менеджмента риска защиты зданий, сооружений и линий коммуникаций от ударов молнии // Инновационное развитие науки: фундаментальные и прикладные проблемы. Петрозаводск : Международный центр научного партнерства «Новая Наука», 2020. С. 201–234.
- Архипова Е.П. Карты географического распределения числа дней с грозой на территории СССР // Труды ГГО. 1957. Вып. 74. С. 41–60.
- Барановский Н.В. Прогнозирование лесной пожарной опасности в условиях грозовой активности. Новосибирск : Изд-во Сибирского отделения РАН, 2019. 235 с.
- Беликова М.Ю., Каранина С.Ю., Каранин А.В., Глебова А.В. Визуализация и анализ данных сети WWLLN на территории Алтае-Саянского региона средствами Веб-ГИС // Кибернетика и программирование. 2018. № 2. С. 1–8.
- Говорушко С.М. Риски для человеческой деятельности, связанные с грозами // Проблемы анализа риска. 2011. Т. 8, № 4. С. 48–57.
- Горбатенко В.П., Ершова Т.В. Молния как звено глобальной электрической цепи. Томск : Изд-во ТГПУ, 2011. 204 с.
- Горбатенко В.П., Кужевская И.В., Пустовалов К.Н., Чурсин В.В., Константинова Д.А. Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях изменяющегося климата Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 108–117.
- 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. Т. 2. С. 35–57.
- Клещева Т.И., Поталова Е.Ю., Пермяков М.С. Сравнение данных глобальной сети локализации молний WWLLN и стандартных наблюдений на метеостанциях юга Дальнего Востока России // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 89–98.
- Кожекаръ Д.С., Баранецкий В.В. Лесные пожары: причины и последствия их возникновения // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2021. № 1 (8). С. 202–205.
- 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.
- Прокофьева Н.Б., Осипова Е.В. Характер грозовой активности на территории Тверской области за последние 30 лет // Вестник ТвГУ. Серия: География и геоэкология. 2020. № 4. С. 95–108.
- 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. Физико-математические науки. 2021. Т. 37, № 4. С. 203–215.
- Тарабукина Л.Д., Козлов В.И., Иннокентьев Д.Е. Анализ 11-летней динамики пространственного распределения плотности молний в Северной Азии // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2021. Т. 34, № 1. С. 159–173.

Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Коршунова Н.Н., Курганский М.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Швець Н.В., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 27–41.

Copernicus Climate Change Service. Climate reanalysis. URL: <https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis> (дата обращения: 07.08.2022).

Dowden R.L., Brundell J.B., Rodger C.J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2002. V. 64 (7). P. 817–879.

Dowdy A. Seasonal forecasting of lightning and thunderstorm activity in tropical and temperate regions of the world // Scientific Reports. 2016. V. 6 (20874). P. 1–10.

Eliseev A.V., Ploskov A.N., Chernokulsky A.V., Mokhov I.I. A correlation between lightning flash frequencies and the statistical characteristics of convective activity in the atmosphere // Doklady Earth Sciences. 2019. V. 485, P. 1. P. 273–278.

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

Konstantinova D.A., Gorbatenko V.P., Polyakov D.V. Spatial distribution of the thunderstorm activity characteristics for the territory of Western Siberia // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2017. V. 10466. P. 1–7.

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. V. 13 (5):669. P. 1–16.

Mallick S., Rakov V.A., Ngini T., Gamarota W.R., Pilkey J.T., Hill J.D., Uman M.A., Jordan D.M., Hutchins M.L., Holzworth R.H. Evaluation of the WWLLN performance characteristics using rocket-triggered lightning data // International Conference on Grounding and Earthing & 6th International Conference on Lightning Physics and Effects. 2014. P. 312–316.

Nechepurenko O.E., Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A., Pustovalov K.N. Linking the storm cells position and high values of instability indices – a case study in the southeast of Western Siberia // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 012006. P. 1–7.

Rodger C.J., Brundell J.B., Hutchins M., Holzworth R.H. The world wide lightning location network (WWLLN): Update of status and applications // 2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS). 2014. P. 1–2.

Schultz C.J., Nauslar N.J., Wachter J.B., Hain C.R., Bell J.R. Spatial, temporal, and electrical characteristics of lightning in reported lightning-initiated wildfire events // Fire. 2019. V. 2 (18). P. 1–15.

Sfica L., Apostol L., Istrate V., Lesenciu D., Necula F. Instability Indices as Predictors of Atmospheric Lightning – Moldova Region Study Case // 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015, Conference Proceedings – Hydrology and Water Resources. 2015. P. 387–394.

Taszarek M., Allen J.T., Púci T., Hoogewind K.A., Brooks H.E. Severe convective storms across Europe and the United States. Part II: ERA5 environments associated with lightning, large hail, severe wind, and tornadoes // Journal of Climate. 2020. V. 33 (24). P. 10263–10286.

Utsav B., Deshpande S.M., Das S.K., Pawar S.D., Pandithurai G. Relationship between convective storm properties and lightning over the Western Ghats // Earth and Space Science. 2022. V. 9. P. 1–16.

Virts K.S., Wallace J.M., Hutchins M.L., Holzworth R.H. Highlights of a new ground-based, hourly global lightning climatology // Bulletin of the American Meteorological Society. 2013. V. 94. P. 1381–1391.

WWLLN – World Wide Lightning Location Network. URL: <http://webflash.ess.washington.edu/> (дата обращения: 07.08.2022).

References

Adzhiev A.H., Kuliev D.D. Characteristics of storm activity and parameters of lightning discharges in the south of the European part of Russia // Izvestiya, Atmospheric and oceanic physics. 2018. V. 54(4). pp. 372–379.

Adzhiev A.H., Kuliev D.D., Adzhieva A.A., Kupovykh G.V., Tumgoeva H.A. *Opređenje parametров molniyevykh razryadov s ispol'zovaniem grozoregistratora LS 8000* [Definition of lightning parameters with the use of thunderstorm registry LS8000] // Bulletin of higher education institutes North Caucasus region. Natural sciences. 2018. No. 3. pp. 55–63. In Russian

Adzhiev A.K., Kupovykh G.V., Andrievska V.Y., Yurchenko N.V., Kudrinskaya T.V., Redin A.A. *Monitoring kharakteristik grozovoy aktivnosti na yuge evropeyskoy chasti Rossii* [Monitoring of the storm activity characteristics in the south of the European part of Russia] // Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. No. 4. pp. 212–223. In Russian

Andrianova L. P., Kabashov V.Yu., Akhmetshin A.T., Atagulov D.T. *Infrastruktura menedzhmenta riska zashchity zdaniy, sooruzheniy i liniy kommunikatsiy ot udarov molnii* [Infrastructure of risk management for protection of buildings, structures and communication lines from lightning strikes] // Innovatsionnoe razvitie nauki: fundamental'nye i prikladnye problemy: monografiya. Petrozavodsk: «Mezhdunarodnyy tsentr nauchnogo partnerstva «Novaya Nauka», 2020. pp. 201–234. In Russian

Arhipova E.P. *Karty geograficheskogo raspredeleniya chisla dnei s grozoy na territorii SSSR* [Maps of the geographical distribution of the number of days with thunderstorms in the USSR] // Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory. 1957. V. 74. pp. 41–60. In Russian

Baranovskiy N.V. *Prognozirovanie lesnoy pozharney opasnosti v usloviyakh grozovoy aktivnosti* [Prediction of forest fire danger caused by lightning activity]. Novosibirsk: «Publishing House of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», 2019. 235 p. In Russian

Belikova M.Y., Karanina S.Y., Karanin A.V., Glebova A.V. *Vizualizatsiya i analiz dannykh seti WWLLN na territorii Altae-Sayanskogo regiona sredstvami Veb-GIS* [Visualization and analysis of WWLLN data in the Altai-Sayan region by means of WebGIS] // Cybernetics and programming. 2018. No. 2. pp. 1–8. In Russian

Govorushko S.M. *Riski dlya chelovecheskoy deyatel'nosti, svyazannye s grozami* [Risks to human activities associated with thunderstorms] // Issues of risk analysis. 2011. V. 8(4). pp. 48–57. In Russian

Gorbatenko V.P., Ershova T.V. *Molnija kak zveno global'noy jelektricheskoy cepi* [Lightning as a link in the global electrical circuit]. Tomsk: Publishing House of the TSPU, 2011. 204 p. In Russian

Gorbatenko V.P., Kuzhevskaya I.V., Pustovalov K.N., Chursin V.V., Konstantinova D.A. Assessment of atmospheric convective potential variability in Western Siberia in changing climate // Russian Meteorology and Hydrology. 2021. V. 46 (6). pp. 403–409.

- Gorbatenko V.P., Tunaev E.L., Pustovalov K.N., Volkova M.A., Nечepurenko O.E. *Izmeneniya ciklogeneza nad Zapadnoj Sibir'ju v 1976–2017 gg.* [The dynamics of cyclogenesis over Western Siberia in 197–2017] // Fundamental and Applied Climatology. 2020. V.2. pp. 35–57. In Russian
- Kleshcheva T.I., Potalova E.Y., Permyakov M.S. Comparison of World Wide Lightning Location Network (WWLLN) data and standard observations at weather stations in the southern Russian Far East // Russian meteorology and hydrology. 2021. V. 6. pp. 89–98. In Russian
- Kozhekhar D., Baranetsky V. *Lesnye pozhary: prichiny i posledstviya ikh vozniknoveniya* [Forest fires: causes and consequences of their occurrence] // Fire and technospheric safety: problems and ways of improvement. 2021. No. 1(8). pp. 202–205. In Russian
- Nechepurenko O.E., Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A., Sevastyanov V.V. *Indeksy neustoychivosti atmosfery i ikh porogovye znacheniya, optimal'nye dlya prognoza groz nad Sibir'yu* [Instability indices and their thresholds for the forecast of thunderstorms over Siberia] // Hydrometeorological research and forecasting. 2018. No. 2 (368). pp. 44–59. In Russian
- Prokofieva N.B., Osipova E.V. *Kharakter grozovoy aktivnosti na territorii Tverskoy oblasti za posledniye 30 let* [The nature of thunderstorm activity in the Tver region over the past 30 years] // Herald of Tver State university. Series: geography and Geoecology. 2020. No. 4. pp. 95–108. In Russian
- Pustovalov K.N., Gorbatenko V.P., Nagorskiy P.M., Nечepurenko O.E. *Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' konvektivnoy neustoychivosti na juge Zapadnoj Sibiri po dannym reanaliza ERA5* [The spatial and temporal variability of convective instability in the south of Western Siberia according to ERA5 reanalysis data] // Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. Nauki. 2021 V. 37(4). pp. 203–215. In Russian
- Tarabukina L.D., Kozlov V.I., Innokentiev D.E. *Analiz 11-letnej dinamiki prostranstvennogo raspredeleniya plotnosti molnij v Severnoj Azii* [Analysis of 11-years dynamics in spatial distribution of lightning density in North Asia] // Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. Nauki. 2021 V. 34(1). pp. 159–173. In Russian
- Chernokulsky A.V., Eliseev A.V., Kozlov F.A., Korshunova N.N., Kurgansky M.V., Mokhov I.I., Semenov V.A., Shvets' N.V., Shikhov A.N., Yarinich Y. I. *Opasnye atmosferynye yavleniya konvektivnogo kharaktera v Rossii: nablyudaemye izmeneniya po razlichnym dannym* [Atmospheric severe convective events in Russia: changes observed from different data] // Russian meteorology and hydrology. 2022. No. 5. pp. 27–41. In Russian
- Copernicus Climate Change Service. Climate reanalysis. URL: <https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis> (Date of accessed 07.08.2022).
- Dowden R.L., Brundell J.B., Rodger C.J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2002. V. 64 (7). pp. 817–879.
- Dowdy A. Seasonal forecasting of lightning and thunderstorm activity in tropical and temperate regions of the world // Scientific Reports. 2016. V. 6 (20874). pp. 1–10.
- Eliseev A.V., Ploskov A.N., Chernokulsky A.V., Mokhov I.I. A correlation between lightning flash frequencies and the statistical characteristics of convective activity in the atmosphere // Doklady Earth Sciences. 2019. V. 485, P.1. pp. 273–278.
- George J.J. Weather forecasting for aeronautics // New York; London: Academic Press. 1960. 684 p.
- Konstantinova D.A., Gorbatenko V.P., Polyakov D.V. Spatial distribution of the thunderstorm activity characteristics for the territory of Western Siberia // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2017. V. 10466. pp. 1–7.
- Kharyutkina E., Pustovalov K., Moraru E., Nечepurenko O. Analysis of spatio-temporal variability of lightning activity and wildfires in Western Siberia during 2016–2021 // Atmosphere. 2022. V. 13(5):669. pp. 1–16.
- Mallick S., Rakov V.A., Ngini T., Gamera W.R., Pilkey J.T., Hill J.D., Uman M.A., Jordan D.M., Hutchins M.L., Holzworth R.H. Evaluation of the WWLLN performance characteristics using rocket-triggered lightning data // International Conference on Grounding and Earthing & 6th International Conference on Lightning Physics and Effects. 2014. pp. 312–316.
- Nechepurenko O.E., Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A., Pustovalov K.N. Linking the storm cells position and high values of instability indices – a case study in the southeast of Western Siberia // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 012006. pp. 1–7.
- Rodger C.J., Brundell J.B., Hutchins M., Holzworth R.H. The world wide lightning location network (WWLLN): Update of status and applications // 2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS). 2014. pp. 1–2.
- Schultz C.J., Nauslar N.J., Wachter J.B., Hain C.R., Bell J.R. Spatial, temporal, and electrical characteristics of lightning in reported lightning-initiated wildfire events // Fire. 2019. V. 2 (18). pp. 1–15.
- Sfica L., Apostol L., Istrate V., Lesenciuc D., Necula F. Instability Indices as Predictors of Atmospheric Lightning – Moldova Region Study Case // 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015, Conference Proceedings – Hydrology and Water Resources. 2015. pp. 387–394.
- Taszarek M., Allen J.T., Púćik T., Hoogewind K.A., Brooks H.E. Severe convective storms across Europe and the United States. Part II: ERA5 environments associated with lightning, large hail, severe wind, and tornadoes // Journal of Climate. 2020. V. 33 (24). pp. 10263–10286.
- Utsav B., Deshpande S.M., Das S.K., Pawar S.D., Pandithurai G. Relationship between convective storm properties and lightning over the Western Ghats // Earth and Space Science. 2022. V. 9. pp. 1–16.
- Virts K.S., Wallace J.M., Hutchins M.L., Holzworth R.H. Highlights of a new ground-based, hourly global lightning climatology // Bulletin of the American Meteorological Society. 2013. V. 94. pp. 1381–1391.
- WWLLN – World Wide Lightning Location Network. URL: <http://webflash.ess.washington.edu/> (Date of accessed 07.08.2022).

Информация об авторах:

Нечепуренко О.Е., кандидат физико-математических наук, доцент, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия; научный сотрудник, лаборатория физики климатических систем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: o.e.nechepurenko@gmail.com

Горбатенко В.П., доктор географических наук, профессор, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: vpgor@tpu.ru

Пустовалов К.Н., кандидат физико-математических наук, доцент, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия; научный сотрудник, лаборатория физики климатических систем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия.

E-mail: const.pv@yandex.ru

Громова А.В., выпускник магистратуры по направлению «Гидрометеорология», кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: gromovaav@inbox.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Nechepurenko O.E., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assistant Professor, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia; Researcher, Laboratory of Physics of Climatic Systems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: o.e.nechepurenko@gmail.com

Gorbatenko V.P., Dr. Sci. (Geography), Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: vpgor@tpu.ru

Pustovalov K.N., Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia; Researcher, Laboratory of Physics of Climatic Systems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia.

E-mail: const.pv@yandex.ru

Gromova A.V., Master's student of Hydrometeorology, Department of Meteorology and Climatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: gromovaav@inbox.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.08.2022; одобрена после рецензирования 04.10.2022; принята к публикации 06.11.2022

The article was submitted 12.08.2022; approved after reviewing 04.10.2022; accepted for publication 06.11.2022