

Характерные значения количества осадков при возникновении пожаров от молний в Западной Сибири по данным реанализа и спутникового мониторинга

Е. В. Харюткина^{1,2}, Е. И. Морару¹, К. Н. Пустовалов^{1,2}

¹ *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
Томск, 634055, Россия*

E-mails: kh_ev@mail2000.ru, MoraruEI@yandex.ru, Const.pv@yandex.ru

² *Национальный исследовательский Томский государственный университет
Томск, 634050, Россия*

На фоне меняющегося климата происходит увеличение молниевой активности, что может привести к росту вероятности возгораний, особенно в арктической зоне Сибири, поскольку здесь они происходят чаще, чем на юге — в 30 и 20 % случаев от всех пожаров соответственно. В работе для Западной Сибири получены характерные значения общего количества атмосферных осадков, при которых возникают пожары из-за молний, в тёплый сезон с 2016 по 2021 г. по данным реанализа ERA5-Land (*англ.* Land component of the fifth generation of European ReAnalysis) и спутникового мониторинга GPM IMERG (*англ.* Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement). Проведена верификация данных об осадках с данными наблюдений на метеостанциях. В целом данные реанализа и спутникового мониторинга воспроизводят общую изменчивость количества осадков, однако данные реанализа завышают значения количества осадков, а спутниковые занижают. Получено, что медианные оценки количества осадков в Западной Сибири составляют 0,5 мм/сут по ERA5-Land и 0 мм/сут по GPM IMERG. Наибольшее число пожаров наблюдается при количестве осадков до 2,5 мм/сут (от «сухих» гроз): 87 и 93 % соответственно. Возгорания от молнии при большем количестве осадков (в диапазоне 2,5–8,0 мм/сут при вероятности 95 %) возникают преимущественно в зоне тундры и лесоболотных экосистем. Эти случаи фактически остаются неучтёнными при оценке степени пожароопасности региона. Полученные результаты исследования будут полезны для задач, связанных с повышением точности методов прогноза потенциальной пожарной опасности, что поможет заблаговременно принять меры по адаптации к изменяющимся условиям природной среды и сократить экономический ущерб от пожаров.

Ключевые слова: атмосферные осадки, характерные значения, молнии, лесные пожары, сухие грозы, Западная Сибирь, спутниковые данные, данные реанализа, данные наблюдений

Одобрена к печати: 16.08.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-373-384

Введение

Возникновение лесных пожаров, как правило, является результатом человеческой деятельности. Однако в бореальных и арктических регионах возгорания происходят преимущественно по причине молниевой активности (Chen et al., 2021; Veraverbeke et al., 2017). Так, например, на севере Западной Сибири доля возможных возгораний от гроз может достигать 30 %, тогда как на юге она составляет 20 % (Kharyutkina et al., 2022b). В арктической зоне пожары от молний (*англ.* lightning-ignited wildfires — LIWs) возникают в большинстве случаев (83 %) практически при отсутствии осадков, т.е. во время случаев так называемых сухих гроз (Kharyutkina et al., 2024). Более того, в северной части Западной Сибири, по сравнению с её южными районами, необходимо наличие более экстремальных (более жарких и засушливых) метеорологических условий для возникновения возгораний от молний. Для выявления случаев с сухими грозами в разных регионах широко используется пороговое количество осадков 2,5 мм/сут: на северо-западе Соединённых Штатов Америки (США) (Rorig, Ferguson, 1999), на Аляске и в Канаде (Drohan, 2012), в бореальных лесах Северной Америки (Peterson et al., 2010), Северной Калифорнии (Kalashnikov et al., 2022) и Каталонии (Pineda, Rodríguez, 2023). Однако пороговые значения осадков в разных регионах могут существенно отличаться, что

обусловлено точностью данных об осадках и методов их обработки, влиянием рельефа местности, метеорологических условий. Например, для различных регионов США было установлено, что широко используемый порог в 2,5 мм/сут не всегда отражает риск возгорания от молнии: на западе США, как правило, количество осадков при сухих грозах, приводящих к пожарам, было выше (2,8 мм/сут) (Kalashnikov et al., 2023), а на юге — ниже этого значения (менее 2 мм/сут) (Hall, 2007). Если во время грозы выпало менее 1 мм осадков, то вероятность возникновения пожара от молнии примерно в четыре раза выше, чем при наличии осадков (Dowdy, Mills, 2009). Согласно результатам сравнения количества LIWs в работе (Kharyutkina et al., 2024) для Западной Сибири, в северных районах вполне можно использовать порог 0,25 мм/сут, а в более южных — 2,5 мм/сут.

На данный момент существует проблема отсутствия надёжных данных по осадкам. Наблюдения за осадками на метеорологических станциях проводятся всего два раза в сутки, при этом сеть станций, в частности на территории Западной Сибири, достаточно редкая, особенно в её северных районах. Более детальные и равномерно распределённые данные об атмосферных осадках, особенно в тех районах, где наблюдения за осадками затруднены или вовсе невозможны, могут обеспечить архивы данных, рассчитанные в узлах регулярной сетки (Kharyutkina et al., 2022a). Однако некоторые из них уже не обновляются, например, APHRODITE (*англ.* Asian Precipitation — Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of Water Resources) и GPCC (*англ.* Global Precipitation Climatology Centre) (<http://www.chikyuu.ac.jp/precip>; <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.gpcc.html>); другие базы данных не полностью покрывают исследуемую территорию, например, CARRA (*англ.* Copernicus Arctic Regional Reanalysis) (<https://climate.copernicus.eu/copernicus-arctic-regional-reanalysis-data-now-updated-monthly>). Возможным выходом в этом случае может быть использование данных спутникового мониторинга (в особенности в микроволновом диапазоне длин волн), а также данных реанализа ERA5 (*англ.* fifth generation of European ReAnalysis), которые имеют на данный момент наилучшее пространственное разрешение, по сравнению с другими архивами. Тем не менее для оценки точности полученных значений атмосферных осадков крайне важно проводить валидацию реанализа и спутниковых данных. Достоверная информация о количестве осадков необходима для повышения точности методов прогноза потенциальной пожарной опасности, что поможет заблаговременно принять меры по адаптации к изменяющимся условиям природной среды.

Подобного исследования для региона ранее не проводилось, поэтому целью работы является сравнительный анализ и получение характерных значений количества атмосферных осадков, при которых возникают пожары от молний, по данным реанализа и спутникового мониторинга для разных природных зон Западной Сибири за период 2016–2021 гг.

Используемые данные и методы исследования

Объект исследования и исходные данные

Исследование проводилось на территории Западной Сибири (далее ЗС; 45–75° с.ш., 60–90° в.д.) в тёплое время года (с мая по сентябрь) за период 2016–2021 гг. Так как исследуемая территория обладает разнообразными природно-климатическими условиями, она была условно поделена на три широтные зоны по типу растительности по данным Land Cover Type (MCD12Q1) (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>): южная часть Западной Сибири (ЮЗС, 45–55° с.ш.) — зона степей и лесостепей; центральная часть Западной Сибири (ЦЗС, 55–65° с.ш.) — зона тайги, смешанных лесов и заболоченных территорий; и северная часть Западной Сибири (СЗС, 65–75° с.ш.) — зона тундры и многолетней мерзлоты (*рис. 1*, см. с. 375).

В качестве исходных данных использовались:

1. Данные об активных пожарах (тепловые аномалии) из архива FIRMS (*англ.* Fire Information for Resource Management System) по данным MODIS (*англ.* Moderate

Resolution Imaging Spectroradiometer) с временным разрешением 1 сут и пространственным разрешением 1×1 км (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>). Эти данные могут указывать не только на реальное возгорание, но и на объекты промышленности. Для исключения их из выборки мы использовали базу данных постоянных огней Института космических исследований Российской академии наук (<http://ckp.geosmis.ru/>).

2. Данные о координатах и времени молниевых разрядов за каждый час, зарегистрированных WWLLN (*англ.* World Wide Lightning Location Network), которые находятся в открытом доступе на официальном сайте WWLLN (<https://wwlln.net/>).
3. Данные о количестве атмосферных осадков получены из следующих архивов:
 - данные реанализа ERA5-Land (*англ.* Land component of the fifth generation of European ReAnalysis) (далее ERA5) с временным разрешением 1 ч и пространственным разрешением $0,1 \times 0,1^\circ$ по широте и долготе (<https://reanalyses.org/atmosphere/era5-references>);
 - данные спутникового мониторинга GPM IMERG (*англ.* Integrated Multi-satellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement), которые представляют собой базу данных восстановленных суточных сумм атмосферных осадков в ячейках $0,1 \times 0,1^\circ$ по широте и долготе. Был использован набор данных GPM IMERG Final Precipitation L3 1 day $0.1 \text{ degree} \times 0.1 \text{ degree}$ V06 (GPM_3IMERGDF), который на данный момент обновлён до версии 7 (Huffman et al., 2023);
 - данные наблюдений на метеорологических станциях Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) (<http://meteo.ru/>).

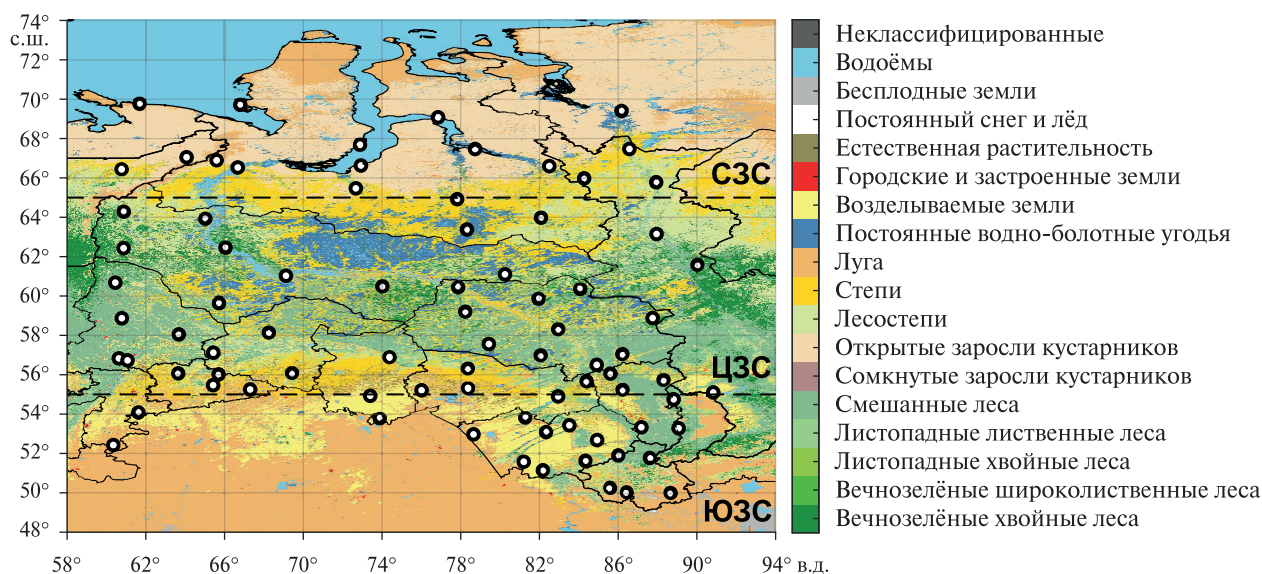


Рис. 1. Расположение метеорологических станций в Западной Сибири с учётом типа подстилающей поверхности

Методы исследования

Одним случаем пожара считалась первая зарегистрированная тепловая аномалия в одни сутки. Все соседние тепловые аномалии, зафиксированные в эти же сутки и расположенные от первой тепловой аномалии в радиусе 2 км, относились к одному кластеру — пожару. Мы учитывали координаты только первой тепловой аномалии, считая её очагом пожара. Такая процедура кластеризации позволила значительно сократить выборку тепловых аномалий. Для идентификации случаев LIWs для найденного дня пожара мы определяли координаты впервые зафиксированного во времени молниевого разряда, расположенного на расстоянии

не более 10 км от определённого ранее очага пожара. Выбор радиуса 10 км основан на точности данных WWLLN. Расстояние между очагом пожара и грозовым разрядом рассчитывалось с использованием функции distance в среде программирования MATLAB.

Вероятность возникновения LIWs оценивалась по формуле, согласно (Larjavaara et al., 2005):

$$B = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_i),$$

где A — индекс, характеризующий близость очага пожара и молниевое разряда, изменяется в диапазоне $[0, \dots, 1]$, $A = \left(1 - \left(\Delta t / \Delta t_{\max}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(D / D_{\max}\right)\right)$; D и Δt — расстояние и временной интервал (в сут) между молнией и пожаром соответственно; $D_{\max}$ — максимальное расстояние (радиус) между молнией и пожаром; $\Delta t_{\max}$ — максимальный временной интервал. Учитывались только случаи LIWs с вероятностью их возникновения более 80 %. Критерий Δt обозначает период тления — период от момента молниевое разряда до возгорания (Peterson, 2010); меняется от 0 до 6 дней до возгорания (0 — день пожара). Выбор диапазона Δt обусловлен предположением, что выявленные случаи стали следствием определённого синоптического процесса, который происходил в течение определённого периода на определённой территории (естественный синоптический период (5–7 дней)) (Хромов, Мамонтова, 1963). Оценки количества осадков для периода тления были получены путём осреднения суточных сумм осадков за период от 1 до 6 дней до возгорания. Объём полученной выборки составил 3020 ± 142 случая LIWs в Западной Сибири.

Статистическая значимость полученных оценок рассчитывалась с использованием двустороннего t -теста нулевой гипотезы при $\alpha = 0,05$ (Von Storch, 1999).

Анализ и обсуждение результатов

Сравнение данных об атмосферных осадках

На *рис. 2а* (см. с. 377) приведено пространственное распределение количества осадков по данным реанализа, спутникового мониторинга и наблюдений на метеорологических станциях для ЗС за период 2016–2021 гг. При обработке данных наблюдений интерполяция проводилась по методу естественных соседей (natural), который является оптимальным для интерполяции геофизических величин (Петин, Васильев, 2011).

По всем базам данных получено, что области максимальных значений наблюдаются в центральной части, а области минимальных — на севере и юге региона. Локальные зоны с максимальными значениями осадков по данным наблюдений и реанализа отмечаются в районе Алтайских гор, а по данным реанализа — ещё и на северо-востоке, северо-западе (арктическая зона), что также обусловлено орографией, а именно влиянием Енисейского кряжа и Уральских гор соответственно.

О завышении оценок в горной местности в регионе исследования ранее также отмечалось в работах (Kharyutkina et al., 2022b; Voropay et al., 2021). В целом по исследуемой территории за тёплый период года представленные в данных реанализа оценки количества осадков показывают завышенные значения на ~ 150 – 300 мм (~ 50 %) (*рис. 2б, слева*). При этом данные GPM IMERG в целом воспроизводят более низкие значения на ~ 50 – 150 мм (~ 25 %), по сравнению с данными метеостанций и реанализа (*рис. 2б, справа*). Стоит отметить, что по спутниковым данным более чётко выражены области максимума в поймах рек. Это, возможно, связано с тем, что повышенная влажность в этих районах (например, туман или низкая облачность) может детектироваться как область осадков. Согласно работе (Kartavykh et al., 2022), верификация данных об атмосферных осадках GPM IMERG и на метеостанциях для территории ЗС показала хорошую согласованность со средней невязкой 1,2 мм, при этом в горных районах на 14–35 % невязка выше, чем на равнине.

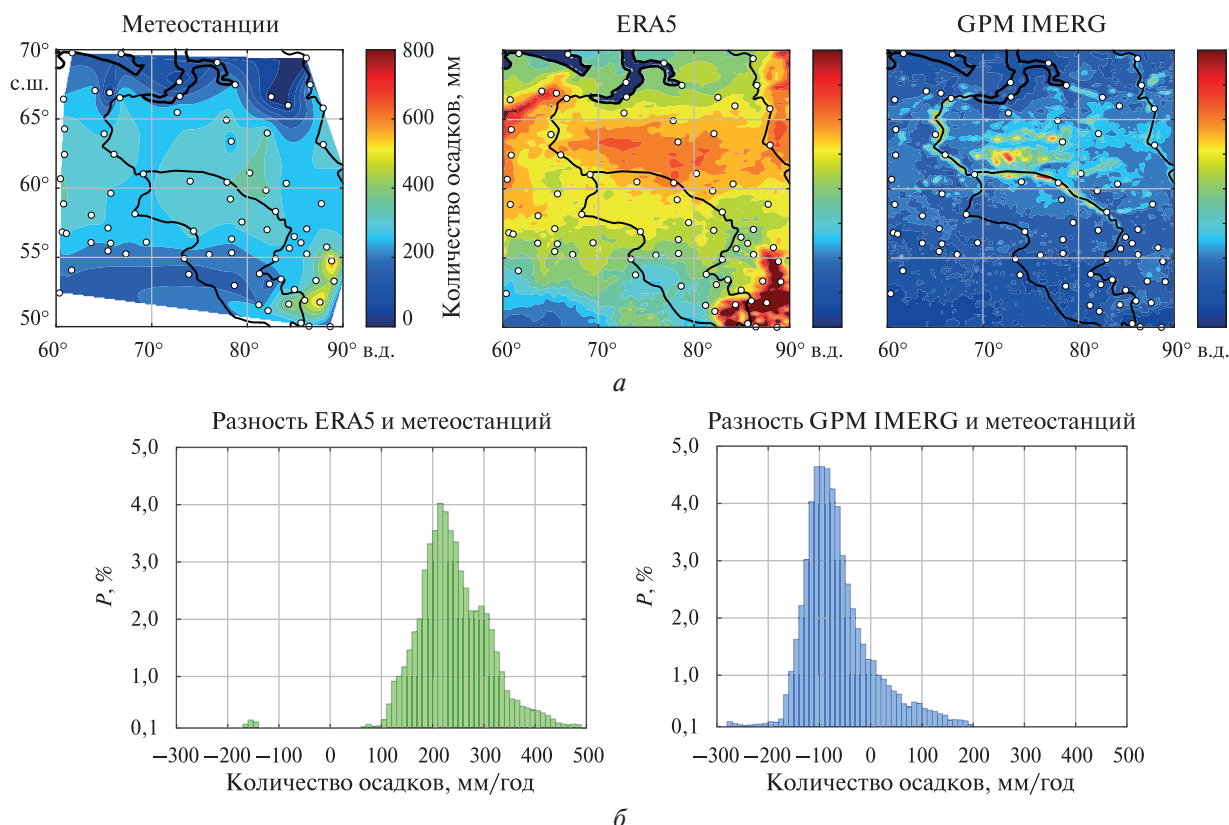


Рис. 2. Пространственное распределение средних за период с мая по сентябрь сумм осадков за 2016–2021 гг. (а) и их разности между данными метеостанций, ERA5 и GPM IMERG (б). P — повторяемость, белые круги — метеорологические станции

Согласно полученным результатам, данные реанализа и спутникового мониторинга воспроизводят общую изменчивость количества осадков в тёплый сезон, которая отражается в данных наблюдений. При этом ERA5 завышает значения количества осадков на большую величину, чем GPM IMERG занижает. Однако рассмотренные базы данных содержат разного рода неопределённости при оценке количества осадков и, как следствие, воспроизводят их изменчивость с некоторыми погрешностями, особенно в горных и прибрежных районах.

Пространственно-временные характеристики атмосферных осадков при пожарах от гроз

Анализ полученных результатов, представленных на рис. 3 (см. с. 378), показал, что во всех рассматриваемых регионах ЗС наибольшие значения количества осадков во время возгораний от молний наблюдаются в июне. При этом количество осадков практически во все месяцы тёплого сезона в день пожара меньше, чем в среднем за 1–6 дней до него (см. рис. 3). Однако этого не наблюдается на севере ЗС по данным GPM IMERG (см. рис. 3б, справа).

В день пожара максимум количества осадков отмечается над равнинной частью Западной Сибири, над Среднесибирской низменностью и южной периферией Сибирских увалов (с максимумом в районе Сургута и Ханты-Мансийска) (рис. 4, см. с. 379). Указанные области относятся к ЦЗС (55–65° с. ш.), в которой располагаются районы преимущественно с лесными и болотными экосистемами, что, наряду с циркуляционно-синоптическими процессами, оказывает влияние на формирование влажностного режима поверхности и атмосферы. Пожары от молний с количеством осадков менее 0,1 мм/сут происходят преимущественно в юго-западной части ЗС, включая северную часть Казахстана, что наиболее характерно в день пожара.

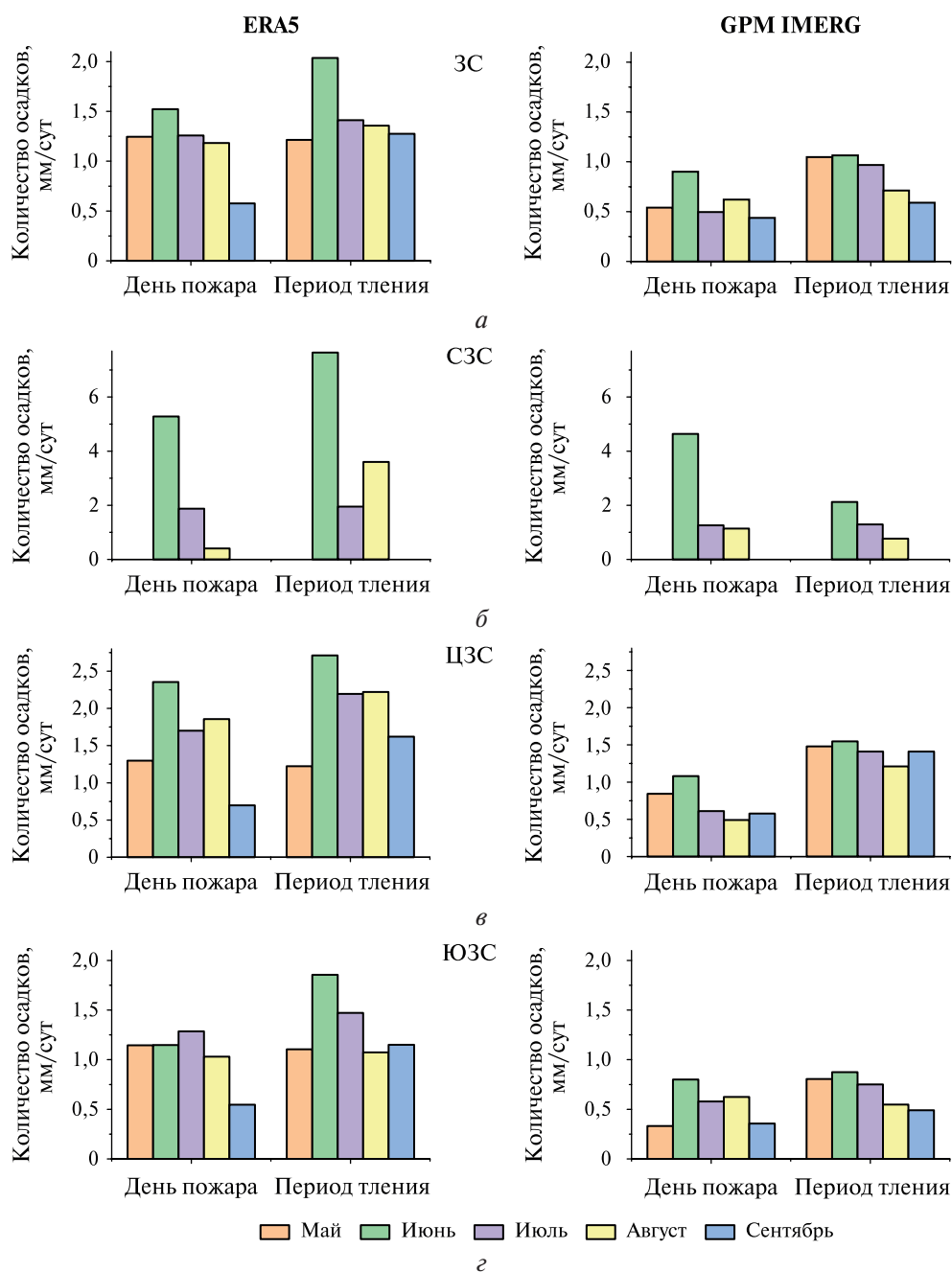


Рис. 3. Средние месячные оценки количества атмосферных осадков по данным реанализа (слева) и спутникового зондирования (справа) за 2016–2021 гг. при LIWs в регионах Западной Сибири: а — ЗС; б — СЗС; в — ЦЗС; г — ЮЗС

Данные реанализа завышают значения осадков на юго-востоке территории ЗС, над навесными (западными) склонами горных массивов (Кузнецкого Алатау, Западного Саяна, Салаирского кряжа, Алтайских гор и Среднесибирского плоскогорья). Максимальные осадки в этих районах отмечаются также и по данным наблюдений (Kharyutkina et al., 2022a).

Количество LIWs при разных диапазонах осадков, которые наблюдаются в день пожара в регионах Западной Сибири, представлено в табл. 1. Наибольшее количество возгораний, вызванных молниевой активностью, наблюдается при количестве осадков до 2,5 мм/сут (сухие грозы): 87 % — по данным ERA5 и 93 % — по данным GPM IMERG. По спутниковым данным получено, что большинство LIWs во всех регионах происходят практически при отсутствии осадков (до 0,25 мм/сут).

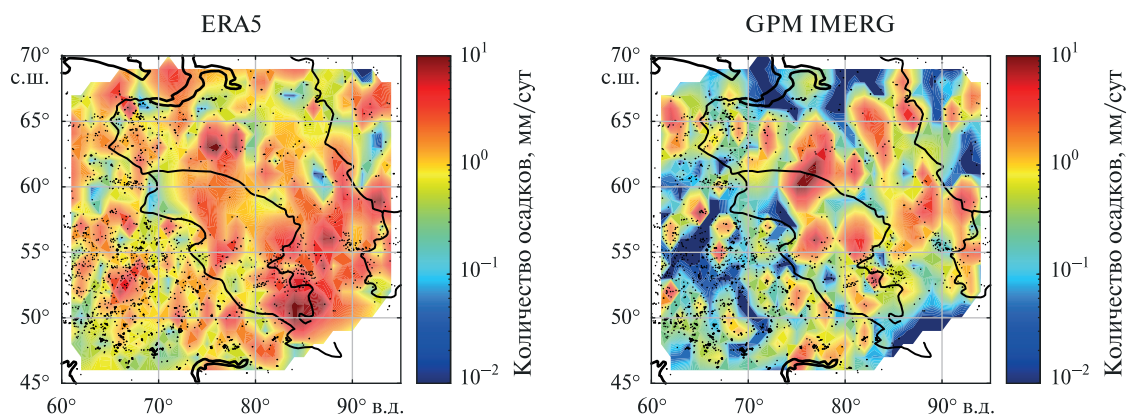


Рис. 4. Пространственное распределение количества осадков при LIWs в день пожара в Западной Сибири за тёплый сезон 2016–2021 гг. Серые точки — все случаи LIWs за исследуемый временной интервал

Таблица 1. Количество LIWs для разных диапазонов количества осадков (в мм/сут) в день пожара за тёплый сезон 2016–2021 гг. в регионах Западной Сибири

Количество осадков, мм/сут	0–0,25	0,26–2,50	2,51–6,00	>6,01
<i>ERA5</i>				
СЗС, %	56	33	8	3
ЦЗС, %	42	41	10	7
ЮЗС, %	43	46	8	3
ЗС, %	44	43	9	4
<i>GPM IMERG</i>				
СЗС, %	79	11	6	4
ЦЗС, %	73	20	5	2
ЮЗС, %	72	22		1
ЗС, %		21		2

Таблица 2. Статистические характеристики количества осадков (в мм/сут) за период 2016–2021 гг. при LIWs в регионах Западной Сибири

	ERA5							GPM IMERG						
Квантиль	0,10	0,25	0,50	0,75	0,90	0,95	0,99	0,10	0,25	0,50	0,75	0,90	0,95	0,99
<i>ЗС</i>														
День пожара	0	0,4	1,4	3,0	5,2	11,6		0		0,4	1,7	3,1	8,2	
Период тления	0	0,2	1,2	3,6	6,4	14,2		0		0,5	2,2	4,5	12,7	
<i>СЗС</i>														
День пожара	0	0,2	1,1	2,8	4,4	7,3		0		0,4	1,9	3,3	9,6	
Период тления	0	0,1	0,9	2,9	5,5	14,1		0		0,9	3,5	6,7	18,5	
<i>ЦЗС</i>														
День пожара	0	0,5	1,7	4,3	7,3	13,8		0		0,1	2,2	4,9	10,2	
Период тления	0		1,9	5,1	7,8	15,7		0		0,7	3,5	6,6	15,2	
<i>ЮЗС</i>														
День пожара	0	0,4	1,3	2,6	4,1	10,3		0		0,4	1,5	2,7	6,4	
Период тления	0	0,1	0,9	3,0	5,7	13,8		0		0,3		3,2	8,7	

Для данных реанализа это характерно только в СЗС, а количество LIWs в ЦЗС и ЮЗС происходит примерно с одинаковой частотой как в диапазоне 0,00–0,25 мм/сут, так и в диапазоне 0,25–2,5 мм/сут. Медианные оценки количества осадков при LIWs по данным реанализа для регионов Западной Сибири не превышают 0,5 мм/сут как в день пожара, так и за период тления (*табл. 2*). При этом наибольший разброс значений (интерквартильный размах) отмечается в центре региона (1,9 мм/сут), а наименьший — на севере и юге (0,9 мм/сут). По данным GPM IMERG медианные оценки количества осадков около 0 мм/сут в каждой из зон, а разброс значений в целом по территории ниже в 2–3 раза. При этом значения интерквартильного размаха увеличиваются с юга на север (от 0,3 до 0,9 мм/сут).

Указанные оценки, которые характеризуют верхнюю границу диапазона изменчивости (по интерквартильному размаху), для других регионов земного шара являются только медианными оценками. Например, в западной части США среднее количество осадков, при которых могут возникать LIWs, составляет 2,8 мм/сут, а пожары, которые обнаруживаются через 2–5 дней после удара молнии, сопровождаются значительно большим количеством осадков (5,1 мм/сут), по сравнению с пожарами, выявленными сразу после возгорания (2,5 мм/сут) (Kalashnikov et al., 2023). Такие различия пороговых значений количества осадков в разных регионах обусловлено разными географическими и климатическими условиями.

Стоит отметить, что LIWs, согласно *табл. 1*, в 13 % случаев по данным реанализа (с максимумом в ЦЗС) и в 7 % случаев по данным спутникового мониторинга (с максимумом в СЗС) происходят при осадках более 2,5 мм/сут. Эти случаи попадают в диапазон экстремальных значений и фактически остаются неучтёнными при оценке степени пожароопасности региона (*табл. 2*). По значениям 0,95-квантиля можно определить пороговую величину количества осадков, выше которой возгорания от молний происходят в экстремальных случаях: так, для ЗС в день пожара она составляет ~5 и ~3 мм/сут по данным реанализа и спутникового мониторинга соответственно (максимальные значения в ЦЗС). В период тления значения количества осадков немного выше: ~6 и 4,5 мм/сут в ЗС с максимальными значениями (при вероятности 95 %) в ЦЗС — ~8 мм/сут (ERA5) и в СЗС — ~7 мм/сут (GPM IMERG).

Согласно полученным результатам (*табл. 1 и 2*), можно сделать вывод, что в целом для ЗС и её отдельных районов применение общепринятого порогового значения количества осадков при LIWs от сухих гроз (2,5 мм/сут (Rorig, Ferguson, 1999)) является вполне оправданным, если опираться на медианные оценки. При этом в отдельных районах ЗС (в зоне тундры и лесоболотных экосистем) возгорания происходят при количестве осадков, значительно превосходящем медианные значения. Поэтому целесообразно учитывать не только средние значения количества осадков, но и их экстремальные значения.

Полученные статистические характеристики количества атмосферных осадков при LIWs отличаются по разным источникам данных, что может быть связано с различными методами получения и усвоения данных. Возможным объяснением этого является редкая и неравномерная сеть наблюдений, данные которых усваиваются в реанализе. С другой стороны, точность восстановления осадков алгоритмом GPM IMERG может быть обусловлена влиянием рельефа и типа подстилающей поверхности. Например, согласно работе (Kartavykh et al., 2022), при сравнении точности данных GPM IMERG для различных форм рельефа на юге ЗС было отмечено, что ошибка в горных районах выше, чем на равнине. С этой точки зрения для горных и пойменных районов предпочтительнее использовать данные реанализа ERA5.

Осадки являются важным фактором возникновения возгорания, но не менее важную роль играют и другие метеорологические параметры (Perez-Invernón et al., 2021). При количестве осадков до 2,5 мм/сут наиболее значительные изменения метеорологических условий в ЗС, как правило, происходят за 3–4 дня до возгорания от молнии (Kharyutkina et al., 2024). Существенные изменения наблюдаются также в термобарическом поле в средней тропосфере и в характеристиках влажности подстилки, особенно в арктической части ЗС. Высокие оценки связей наблюдаются с процессами атмосферной циркуляции — компонентами зональной и меридиональной скорости ветра на 500 гПа. Для возникновения возгораний от молний в СЗС должны наблюдаться более экстремальные (более жаркие, сухие и ветре-

ные) метеорологические условия. Таким образом, полученные ранее пороговые оценки метеорологических условий при возникновении LIWs при одном и том же количестве осадков вполне применимы для центральных и южных регионов ЗС; для СЗС эти оценки могут отличаться. Кроме того, изменчивость метеорологических условий, «благоприятных» для формирования LIWs, обусловлена генезисом грозовой деятельности: на юге грозы могут быть как фронтальные, так и внутримассовые (за счёт более развитой конвективной деятельности); на севере они имеют преимущественно фронтальное происхождение (конвективная неустойчивость меньше, чем на юге, из-за недостаточного прогрева поверхности, однако оказывает существенное влияние адвекция воздушных масс с океана) (Горбатенко и др., 2020; Морару, 2022).

Таким образом, значения количества осадков при пожарах от молний различаются в разных районах исследуемой территории, что обусловлено особенностями их физико-географического положения.

Заключение

В работе для разных районов Западной Сибири проведён сравнительный анализ и получены характерные значения количества атмосферных осадков, при которых возникают пожары от молний, по данным реанализа и спутникового мониторинга. Сравнительный анализ показал, что данные реанализа ERA5-Land завышают значения количества осадков, а GPM IMERG занижают относительно данных наблюдений на метеостанциях. В целом данные реанализа и спутникового мониторинга воспроизводят общую изменчивость количества осадков в тёплый сезон, которая отражается в данных наблюдений. Стоит отметить, что несмотря на самое высокое на данный момент пространственное разрешение использованных данных об осадках, тем не менее наблюдается мозаичность их распределения по территории. Вероятно, это связано с грубым воспроизведением конвективных осадков как в данных реанализа, так и в данных спутникового мониторинга (их характеристики могут меняться на масштабах до 1 км).

В Западной Сибири в июне возгорания от молний происходят, как правило, при большем, чем в другие месяцы, количестве осадков. В день пожара количество осадков меньше, чем в среднем за 1–6 дней до пожара, за исключением северной части региона. Наибольшее число таких событий наблюдается при количестве осадков до 2,5 мм/сут (от сухих гроз): 87 % — по данным ERA5-Land и 93 % — по данным GPM IMERG. Медианные оценки количества осадков при пожарах от молний по ERA5-Land изменяются от 0,2 до 0,5 мм/сут, в зависимости от ландшафтной зоны Сибири. По данным GPM IMERG эти оценки составляют около 0 мм/сут в каждой из зон, а разброс значений по территории ниже в 2–3 раза, чем по ERA5-Land.

В 13 и 7 % случаев (по данным реанализа и спутникового зондирования соответственно) пожары от молнии возникают при осадках более 2,5 мм/сут, и, как правило, наблюдаются над центральной и северной частью региона, где преимущественно расположена зона тундры и лесоболотные экосистемы. В редких случаях количество осадков достигало ~5 мм/сут в день пожара и ~7 мм/сут в период тления по GPM IMERG и 7 и 8 мм/сут по ERA5-Land соответственно. Эти значения представляют собой максимальную/пороговую величину количества осадков (вероятность 95 %), выше которой возгораний от молний практически не происходит. Случаи с осадками в диапазоне 2,5–8 мм/сут фактически остаются неучтёнными при оценке степени пожароопасности региона.

Полученные количественные оценки осадков при пожарах от молний для разных ландшафтных зон региона могут быть использованы при создании и тестировании климатических моделей различных пространственных масштабов. При этом для более точного обнаружения таких событий необходимо опираться не только на медианные, но и на экстремально высокие значения осадков, особенно в арктической части территории. Результаты исследования будут полезны для задач, связанных с повышением точности методов прогноза потенциальной

пожарной опасности, что поможет заблаговременно принять меры по адаптации к изменяющимся условиям природной среды и сократить экономический ущерб от пожаров.

Исследование выполнено в рамках госзадания Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (№ 121031300154-1).

Литература

1. Горбатенко В. П., Кузевская И. В., Пустовалов К. Н. и др. Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях изменяющегося климата Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 108–117.
2. Морару Е. И. Пространственно-временная изменчивость адвекции тепла и влаги из океанов Северного полушария в Северную Евразию: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2022. 135 с.
3. Петин А. Н., Васильев П. В. Геоинформатика в рациональном недропользовании. Белгород: БелГУ, 2011. 268 с.
4. Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 620 с.
5. Chen Y., Romps D. M., Seeley J. T. et al. Future increases in Arctic lightning and fire risk for permafrost carbon // Nature Climate Change. 2021. V. 11. P. 404–410. DOI: 10.1038/s41558-021-01011-y.
6. Dowdy A. J., Mills G. A. Atmospheric states associated with the ignition of lightning-attributed fires. Melbourne: Centre for Australian Weather and Climate Research, 2009. 35 p.
7. Drohan J. Predicting dry lightning risk nationwide // JFSP Briefs. 2012. V. 149. P. 1–6.
8. Hall B. L. Precipitation associated with lightning ignited wildfires in Arizona and New Mexico // Intern. J. Wildland Fire. 2007. V. 16. P. 242–254. DOI: 10.1071/WF06075.
9. Huffman G. J., Stocker E. F., Bolvin D. T. et al. GPM IMERG Final Precipitation L3 1 day 0.1 degree $\times$ 0.1 degree V07. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2023. DOI: 10.5067/GPM/IMERGDF/DAY/07.
10. Kalashnikov D. A., Abatzoglou J. T., Nauslar N. J. et al. Meteorological and geographical factors associated with dry lightning in central and northern California // Environmental Research: Climate. 2022. V. 1. Article 025001. DOI: 10.1088/2752-5295/ac84a0.
11. Kalashnikov D. A., Abatzoglou J. T., Loikith P. C. et al. Deepti singh lightning-ignited wildfires in the western United States: Ignition precipitation and associated environmental conditions // Geophysical Research Letters. 2023. V. 50. Article e2023GL103785. 10 p. DOI: 10.1029/2023GL103785.
12. Kartavykh M. S., Pustovalov K. N., Nagorskiy P. M. Verification of GPM IMERG data on the total precipitation in Western Siberia in the warm season // Proc. SPIE. 2022. V. 12341. Article 123412U. DOI: 10.1117/12.2644772.
13. Kharyutkina E. V., Loginov S. V., Martynova Yu. V., Sudakov I. (2022a) Time series analysis of atmospheric precipitation characteristics in Western Siberia for 1979–2018 across different datasets // Atmosphere. 2022. V. 13. Article 189. DOI: 10.3390/atmos13020189.
14. Kharyutkina E. V., Pustovalov K. N., Moraru E. I., Nechepurenko O. (2022b) Analysis of spatio-temporal variability of lightning activity and wildfires in Western Siberia during 2016–2021 // Atmosphere, 2022. V. 13. Article 669. DOI: 10.3390/atmos13050669.
15. Kharyutkina E. V., Moraru E. I., Pustovalov K. N., Loginov S. Lightning-ignited wildfires and associated meteorological conditions in Western Siberia for 2016–2021 // Atmosphere. 2024. V. 15. Article 106. DOI: 10.3390/atmos15010106.
16. Larjavaara M., Pennanen J., Tuomi T. J. Lightning that ignites forest fires in Finland // Agricultural and Forest Meteorology. 2005. V. 132. P. 171–180. DOI: 10.1016/j.agrformet.2005.07.005.
17. Pérez-Invernón F. J., Huntrieser H., Soler S. et al. Lightning-ignited wildfires and long-continuing-current lightning in the Mediterranean Basin: Preferential meteorological conditions // Atmospheric Chemistry and Physics. 2021. V. 21. P. 17529–17557. DOI: 10.5194/acp-21-17529-2021.
18. Peterson D., Wang J., Ichoku C., Remer L. A. Effects of lightning and other meteorological factors on fire activity in the North American boreal forest: Implications for fire weather forecasting // Atmospheric Chemistry and Physics. 2010. V. 10. P. 6873–6888. DOI: 10.5194/acp-10-6873-2010.
19. Pineda N., Rodríguez O. ERA5 reanalysis of environments conducive to lightning-ignited wildfires in Catalonia // Atmosphere. 2023. V. 14. Article 936. DOI: 10.3390/atmos14060936.
20. Rorig M. L., Ferguson S. A. Characteristics of lightning and wildfire ignition in the Pacific Northwest // J. Applied Meteorology and Climatology. 1999. V. 38. P. 1565–1575. DOI: 10.1175/1520-0450(1999)038<1565:COLAWF>2.0.CO;2.
21. Veraverbeke S., Rogers B. M., Goulden M. L. et al. Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests // Nature Climate Change. 2017. V. 7. P. 529–534. DOI: 10.1038/nclimate3329.

22. Von Storch H., Zwiers F. W. Statistical analysis in climate research. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 484 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612336>.
23. Voropay N., Ryazanova A., Dyukarev E. High-resolution bias-corrected precipitation data over South Siberia, Russia // Atmospheric Research. 2021. V. 254. Article 105528. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105528.

Precipitation threshold values during lightning-ignited wildfires in Western Siberia based on reanalysis and satellite monitoring data

E. V. Kharyutkina^{1,2}, E. I. Moraru¹, K. N. Pustovalov^{1,2}

¹ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS
Tomsk 634055, Russia

E-mails: kh_ev@mail2000.ru, MoraruEI@yandex.ru, Const.pv@yandex.ru

² National Research Tomsk State University, Tomsk 634050, Russia

Against the background of climate change, lightning activity increases, it may lead to an increased probability of lightning-ignited wildfires, especially in the Arctic zone of Siberia, since they occur more often here than in the south — in 30 and 20 % of cases of all fires, respectively. In the study, threshold values of the total amount of precipitation during lightning-ignited wildfires (LIWs) were obtained for Western Siberia for warm season from 2016 to 2021 based on the ERA5-Land reanalysis data (Land component of the fifth generation of European ReAnalysis) and the GPM IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurement) satellite monitoring data. Precipitation data were verified with observational data at meteorological stations. The reanalysis and satellite monitoring data reproduce the general variability of precipitation, but the reanalysis data overestimate the precipitation amounts, and the satellite data underestimate them. It was found that the median precipitation estimates in Western Siberia are 0.5 mm/day based on ERA5-Land and 0 mm/day based on GPM IMERG. The greatest number of fires is observed with precipitation amount up to 2.5 mm/day (from “dry” lightning): 87 and 93 %, respectively. LIWs with greater precipitation amount (in the range of 2.5–8.0 mm/day with a probability of 95 %) occur mainly in the tundra zone and forest-swamp ecosystems. These cases actually remain unaccounted when assessing the degree of fire hazard in the region. The obtained results will be useful in solving problems related with raising accuracy of potential fire hazard forecasting methods. This will help to take measures in advance to adapt to changing environmental conditions and reduce economic damage from fires.

Keywords: atmospheric precipitation, threshold values, lightning, wildfires, dry lightning, Western Siberia, satellite monitoring data, reanalysis data, observational data

Accepted: 16.08.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-373-384

References

1. Gorbatenko V. P., Kuzhevskaya I. V., Pustovalov K. N. et al., Assessment of atmospheric convective potential variability in Western Siberia in changing climate, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020, V. 45(5), pp. 360–367, DOI: 10.3103/S1068373920050076.
2. Moraru E. I., *Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' adveksii tepla i vlagi iz okeanov Severnogo polushariya v Severnuyu Evraziyu: Dis. kand. fiz.-mat. nauk* (Spatio-temporal variability of heat and moisture advection from the Northern Hemisphere oceans to Northern Eurasia, Cand. ph.-math. sci. thesis), Tomsk, 2022, 135 p. (in Russian).
3. Petin A. N., Vasil'ev P. V., *Geoinformatika v ratsional'nom nedropol'zovanii* (Geoinformatics in sustainable subsoil use), Belgorod: BelGU, 2011, 268 p. (in Russian).
4. Hromov S. P., Mamontova L. I., *Meteorologicheskii slovar'* (Meteorological dictionary), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1963, 620 p. (in Russian).

5. Chen Y., Romps D. M., Seeley J. T. et al., Future increases in Arctic lightning and fire risk for permafrost carbon, *Nature Climate Change*, 2021, V. 11., pp. 404–410, DOI: 10.1038/s41558-021-01011-y.
6. Dowdy A. J., Mills G. A., *Atmospheric states associated with the ignition of lightning-attributed fires*, Melbourne: Centre for Australian Weather and Climate Research, 2009. 35 p.
7. Drohan J., Predicting dry lightning risk nationwide, *JFSP Briefs*, 2012, V. 149, pp. 1–6.
8. Hall B. L., Precipitation associated with lightning ignited wildfires in Arizona and New Mexico, *Intern. J. Wildland Fire*, 2007, V. 16, pp. 242–254, DOI: 10.1071/WF06075.
9. Huffman G. J., Stocker E. F., Bolvin D. T. et al., *GPM IMERG Final Precipitation L3 1 day 0.1 degree $\times$ 0.1 degree V07*, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2023, DOI: 10.5067/GPM/IMERGDF/DAY/07.
10. Kalashnikov D. A., Abatzoglou J. T., Nauslar N. J. et al., Meteorological and geographical factors associated with dry lightning in central and northern California, *Environmental Research: Climate*, 2022, V. 1, Article 025001, DOI: 10.1088/2752-5295/ac84a0.
11. Kalashnikov D. A., Abatzoglou J. T., Loikith P. C. et al., Deepti singh lightning-ignited wildfires in the western United States: Ignition precipitation and associated environmental conditions, *Geophysical Research Letters*, 2023, V. 50, Article e2023GL103785, 10 p., DOI: 10.1029/2023GL103785.
12. Kartavykh M. S., Pustovalov K. N., Nagorskiy P. M., Verification of GPM IMERG data on the total precipitation in Western Siberia in the warm season, *Proc. SPIE*, 2022, V. 12341, Article 123412U, DOI: 10.1117/12.2644772.
13. Kharyutkina E. V., Loginov S. V., Martynova Yu. V., Sudakov I. (2022a), Time series analysis of atmospheric precipitation characteristics in Western Siberia for 1979–2018 across different datasets, *Atmosphere*, 2022, V. 13, Article 189, DOI: 10.3390/atmos13020189.
14. Kharyutkina E. V., Pustovalov K. N., Moraru E. I., Nechepurenko O. (2022b), Analysis of spatio-temporal variability of lightning activity and wildfires in Western Siberia during 2016–2021, *Atmosphere*, 2022, V. 13, Article 669, DOI: 10.3390/atmos13050669.
15. Kharyutkina E. V., Moraru E. I., Pustovalov K. N., Loginov S., Lightning-ignited wildfires and associated meteorological conditions in Western Siberia for 2016–2021, *Atmosphere*, 2024, V. 15, Article 106, DOI: 10.3390/atmos15010106.
16. Larjavaara M., Pennanen J., Tuomi T. J., Lightning that ignites forest fires in Finland, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, V. 132, pp. 171–180, DOI: 10.1016/j.agrformet.2005.07.005.
17. Pérez-Invernón F. J., Huntrieser H., Soler S. et al., Lightning-ignited wildfires and long-continuing-current lightning in the Mediterranean Basin: Preferential meteorological conditions, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, V. 21, pp. 17529–17557, DOI: 10.5194/acp-21-17529-2021.
18. Peterson D., Wang J., Ichoku C., Remer L. A., Effects of lightning and other meteorological factors on fire activity in the North American boreal forest: Implications for fire weather forecasting, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, V. 10, pp. 6873–6888, DOI: 10.5194/acp-10-6873-2010.
19. Pineda N., Rodríguez O., ERA5 reanalysis of environments conducive to lightning-ignited wildfires in Catalonia, *Atmosphere*, 2023, V. 14, Article 936, DOI: 10.3390/atmos14060936.
20. Rorig M. L., Ferguson S. A., Characteristics of lightning and wildfire ignition in the Pacific Northwest, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 1999, V. 38, pp. 1565–1575, DOI: 10.1175/1520-0450(1999)038<1565:COLAWF>2.0.CO;2.
21. Veraverbeke S., Rogers B. M., Goulden M. L. et al., Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests, *Nature Climate Change*, 2017, V. 7, pp. 529–534, DOI: 10.1038/nclimate3329.
22. Von Storch H., Zwiers F. W., *Statistical analysis in climate research*, Cambridge: Cambridge University Press, 1999, 484 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612336>.
23. Voropay N., Ryazanova A., Dyukarev E., High-resolution bias-corrected precipitation data over South Siberia, Russia, *Atmospheric Research*, 2021, V. 254, Article 105528, DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105528.