

Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным

А. В. Чернокульский^{* **}, А. В. Елисеев^{* ***}, Ф. А. Козлов^{* ***},
Н. Н. Коршунова^{****}, М. В. Курганский^{*}, И. И. Мохов^{* ***},
В. А. Семенов^{* **}, Н. В. Швець^{****}, А. Н. Шихов^{*****},
Ю. И. Ярынич^{* ***}

Проанализированы изменения повторяемости и интенсивности конвективных опасных явлений погоды (КОЯП), включая сильные ливни, грозы, град, шквалы и смерчи в регионах России в теплый период года на основе разных независимых источников информации. По данным наблюдений на российских метеорологических станциях за период 1966—2020 гг. оценены повторяемость гроз, града и сильного ветра, вклад экстремальных ливневых осадков в общую сумму осадков, а также доля небосвода, закрытая кучево-дождевыми облаками. На основе спутниковых данных оценены повторяемость и интенсивность смерчевых и шкваловых событий, вызвавших ветровалы, за 1986—2021 гг. и высота верхней границы облаков глубокой конвекции за 2002—2021 гг. На основе данных реанализа ERA5 проанализирована повторяемость условий, характерных для развития умеренных и интенсивных КОЯП, за 1979—2020 гг. Результаты указывают на общую интенсификацию КОЯП в большинстве регионов России за исключением ряда регионов на юге европейской части России. Повторяемость умеренных КОЯП имеет тенденцию к уменьшению, а наиболее сильных — к увеличению. Полученные результаты целесообразно принимать во внимание при разработке планов адаптации российских регионов и отраслей к изменению климата.

Ключевые слова: конвективные опасные явления погоды, сильные ливни, град, гроза, шквал, смерч, изменения климата, повторяемость, интенсивность, тренд.

DOI: 10.52002/0130-2906-2022-5-27-41

Введение

Начиная со второй половины XIX в. глобальная приповерхностная температура воздуха повысилась на 1,1 С [40]. При этом за счет ряда положи-

^{*} Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук; e-mail: a.chernokulsky@ifaran.ru (Чернокульский Александр Владимирович).

^{**} Институт географии Российской академии наук.

^{***} Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

^{****} Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных.

^{*****} Пермский государственный научно-исследовательский университет.

тельных обратных связей и локальных воздействий [66] приповерхностная температура в высоких широтах Северного полушария повышается быстрее, чем в среднем на планете, в частности в России с 1976 г. — в 2,5 раза быстрее [8]. Отмечается изменение температурного режима в средней тропосфере: в частности, над сушей Северного полушария произошло увеличение вертикального градиента температуры при повышении приповерхностной температуры [18]. Потепление ведет к увеличению как влагоемкости атмосферы [71], так и фактического влагосодержания [31]. Повышение приповерхностной температуры и влажности воздуха, а также увеличение вертикального градиента температуры способствуют интенсификации атмосферной конвекции и могут приводить к усилению и учащению конвективных опасных явлений погоды (КОЯП) [16, 17].

К семейству КОЯП обычно относят крупный град (диаметром более 2 см), шквалы со скоростью более 25 м/с, смерчи (чаще всего I категории и выше по шкале Фудзиты) [30]. В ряде работ к таким явлениям также относят и сильные ливни [30], вызывающие в том числе паводковые наводнения на реках [44]. В подавляющем большинстве случаев КОЯП связаны с прохождением мультячейковых и суперячейковых облаков, так называемых опасных конвективных штормов (*severe convective storms*) (см., например [26, 30]), которые также характеризуются повышенной молниевой активностью [46]. С КОЯП связаны существенные негативные последствия, включая разрушение зданий и объектов инфраструктуры, гибель людей, сплошное повреждение лесного покрова [49, 57], в том числе в России [37, 54, 65]. Отмечается увеличение ущерба от КОЯП [57], который, с одной стороны, связан с усилением факторов подверженности и уязвимости, но отчасти может быть связан и с учащением событий КОЯП.

В данной работе проанализированы наблюдаемые в России изменения повторяемости КОЯП и ряда индикаторов, косвенным образом характеризующих эту повторяемость, на основе разных источников данных, включая данные наземных и спутниковых наблюдений, а также данные реанализа. Обсуждение полученных результатов дополнено обзором существующих работ в данной области исследований.

Данные и методы

Для оценки повторяемости событий КОЯП использованы срочные данные стандартных метеорологических наблюдений с 521 российской станции [4] за 1966—2020 гг. (для ветра — с 1977 г.). Анализировался теплый период года с апреля по сентябрь. На основе этих данных рассматривались как непосредственно события КОЯП (экстремальные ливни, сильный ветер), так и другие переменные, характеризующие повторяемость развития атмосферной конвекции (но не интенсивности): сумма всех ливневых осадков, закрытая кучево-дождевыми облаками доля небосвода днем, град любой интенсивности (выделить отдельно только крупный град по данным срочных наблюдений невозможно, так как информация о размере града отсутствует), наличие гроз.

Для каждого года оценивалась повторяемость дней за теплый период, в которые отмечались град, грозы, максимальная скорость ветра больше 20 или 25 м/с. Повторяемость рассчитывалась как отношение числа таких

дней (например, грозových дней или дней с градом) к общему числу дней с апреля по сентябрь. Доля небосвода, закрытая кучево-дождевыми облаками, $n_{\text{сб}}$ оценивалась на основе информации о морфологическом типе облаков и о балле нижней облачности для светлого времени суток (с 8 до 20 ч по местному времени). Если в срок наблюдались только кучево-дождевые облака, то $n_{\text{сб}}$ была равна баллу нижней облачности (кучевые и кучево-дождевые облака хотя и являются облаками вертикального развития, но кодируются как облака нижнего яруса, поскольку их основание находится на высоте < 2 км), вне зависимости от того, наблюдались ли одновременно с кучево-дождевыми облаками облака другого яруса или нет (так называемая оценка сверху) [35]. Если в срок наблюдений кучево-дождевых облаков не было, то $n_{\text{сб}}$ полагалась равной нулю. Для всего теплого периода $n_{\text{сб}}$ устанавливалась как среднее по всем срокам, выраженное в процентах. Ливневые осадки определялись на основе информации об общей сумме осадков, характере погоды в срок наблюдений и между сроками наблюдений, а также типе облаков (более подробно методика описана в работе [23]). Экстремальные ливни определялись как 95-й перцентиль эмпирического распределения общей суммы осадков (в работе не рассчитывались сильные ливни в классическом определении, как события с осадками 30 мм за 1 ч). Также вычислялся вклад экстремальных ливней в общую сумму осадков за апрель — сентябрь [36].

Изменения всех рассматриваемых параметров на станциях с отсутствием данных для 5 лет и более, а также на горных станциях (высота над уровнем моря > 1000 м) отмечались как незначимые. При оценке ливневых осадков и доли небосвода, закрытой кучево-дождевыми облаками, необходимо учитывать субъективность определения характера погоды и типа облаков, а также резких скачков повторяемости тех или иных типов облаков на некоторых станциях, которые с большой вероятностью являются артефактами [47]. Была проведена проверка однородности станций на подобные скачки согласно процедуре, подробно описанной в работе [36]. Изменения ливневых осадков и доли кучево-дождевых облаков на станциях с выявленной неоднородностью отмечались как незначимые.

Для оценки повторяемости сильных шквалов и смерчей (I категории и выше по шкале Фудзиты) привлекалась информация о ветровалах в лесной зоне европейской части России [65] за 1986—2021 гг., основанная на идентификации ветровалов по данным со спутника “Landsat” и их последующей проверке с помощью снимков высокого разрешения. Более подробное описание процедуры поиска и верификации шкваловых и смерчевых ветровалов, а также характеристик базы данных ветровалов приведено в работе [65], где также указаны возможные факторы временной неоднородности рядов. Однако сделан вывод о квазиоднородности рядов для сплошных ветровалов площадью более 1 км^2 . Из базы данных [65] были выделены и дальше проанализированы именно такие ветровалы (база дополнена событиями за 2018—2021 гг.).

В качестве независимой оценки общей интенсивности конвективных процессов также привлекались спутниковые данные о высоте облаков глубокой конвекции, рассчитанной по данным MODIS для различных характеристик облаков. Использовался продукт MOD_06_L2 коллекции MODIS

6.1 [29], представляющий собой данные для облачных характеристик по региону, попадающему в поле зрения спутника с 5-минутным шагом. Для оценки высоты облака использовалась переменная `cloud_top_height_1km` с разрешением 1 км, при этом для оценки принадлежности облачного пикселя к типу облаков глубокой конвекции накладывались условия на оптическую толщину (23) и обязательное наличие ледяной фазы, для чего использовались, соответственно, переменные `Cloud_Optical_Thickness` и `Cloud_Phase_Optical_Properties`. Высота облаков глубокой конвекции рассчитывалась за месяц для региона Северной Евразии (45—70 с. ш., 30—150 в. д.) как средняя высота всех соответствующих пикселей в этом регионе в данный месяц. Было проанализировано изменение высоты за период 2002—2021 гг. Отдельно рассматривалась высота облаков днем и ночью (с 8 до 20 ч и с 20 до 8 ч по местному времени соответственно). Из-за существенного объема исходных данных анализ был ограничен июлем и наблюдениями со спутника “Terra”.

Для оценки условий, характерных для образования КОЯП, использовался так называемый ингредиентный подход [44]. В рамках этого подхода были проанализированы значения индексов конвективной неустойчивости и их критических значений, формализующих специфические условия атмосферы, характерные для формирования КОЯП (см., например, [45]). Основой расчета индексов были данные современного реанализа ERA5 [50] с высоким пространственным (~30 км), вертикальным (20 уровней от поверхности до высоты 300 гПа) и временным разрешением (1 ч). Для региона Северной Евразии для периода 1979—2020 гг. рассчитано более 50 различных индексов конвективной неустойчивости — термодинамических, динамических, композитных. В данной работе проведен анализ изменений величины лишь некоторых из них, чаще используемых в современных исследованиях КОЯП и наиболее информативных в рамках ингредиентного подхода (см. [30, 69, 70]): доступной конвективной потенциальной энергии CAPE [55], энергии конвективного подавления CIN [41], а также индекса WMAXSHEAR, представляющего собой произведение сдвига ветра (в слое от поверхности до 6 км) и квадратного корня из удвоенного значения CAPE и являющегося достаточно надежным предиктором интенсивных КОЯП [70]. При расчете CAPE и CIN начальные температура и влажность поднимающегося объема воздуха были вычислены как среднее по нижнему километровому слою (так называемые Mixed Layer CAPE/CIN). Также оценивались изменения индекса молниевой активности, представляющего собой произведение часовых значений CAPE и осадков P ($P \cdot \text{CAPE}$) [62]. Были рассчитаны изменения средних значений индексов (за период с апреля по сентябрь) и повторяемости ряда критических значений.

Межгодовая изменчивость рассмотренных переменных аппроксимировалась линейным трендом, рассчитанным на основе непараметрической медианной оценочной функции Тейла — Сена, менее чувствительной к выбросам, чем стандартный метод наименьших квадратов [13]. Уровень значимости тренда оценивался на основе ранговой корреляции Манна — Кендалла [13].

Результаты и обсуждение

Согласно данным наблюдений на метеорологических станциях, для характеристик ливневых осадков — суммы осадков во время всех ливневых дождей, суммы осадков во время экстремальных ливней (95-го процентиля), вклада этих ливней в общую сумму осадков — отмечаются согласованные и значимые положительные изменения (рис. 1а—в). Статистически значимый рост рассмотренных характеристик ливневых осадков отмечается на большинстве станций, особенно сильный — на юге Сибири и юге Дальнего Востока (до 8% за десятилетие на отдельных станциях). Наименьшие изменения (как по величине, так и по количеству станций со ста-

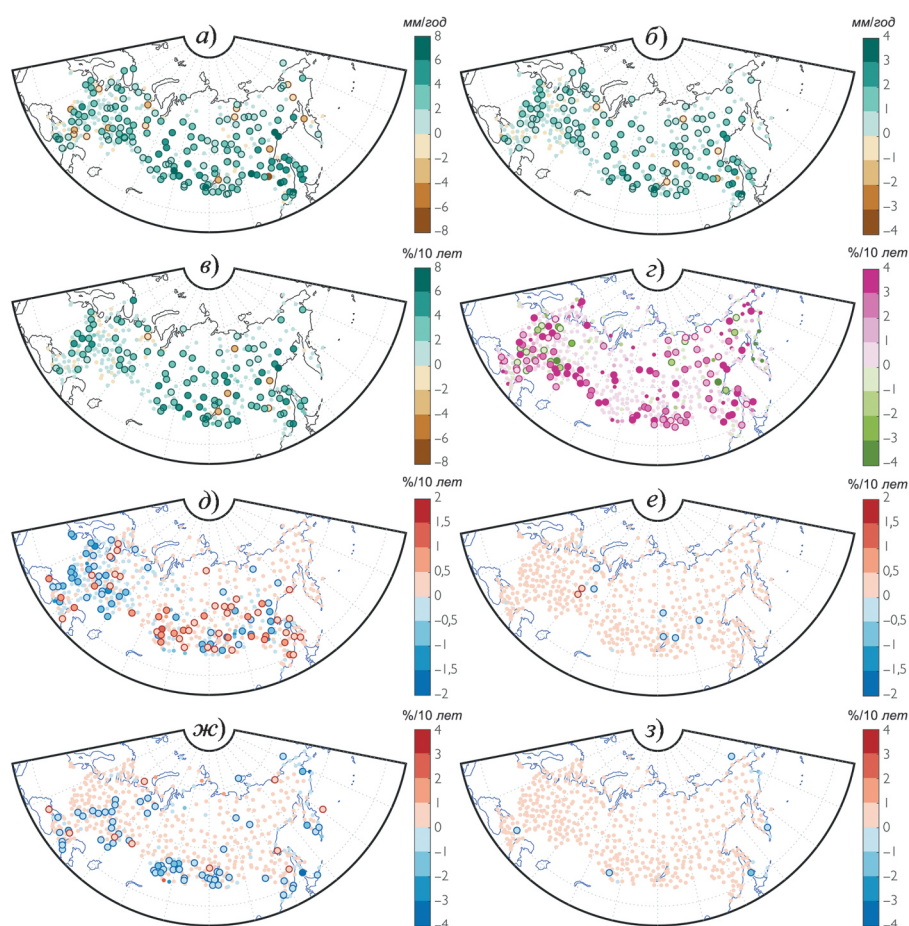


Рис. 1. Тренды по данным станционных наблюдений в теплый период года (апрель — сентябрь) для суммы ливневых осадков (а), суммы ливневых осадков 95-го процентиля (б), вклада ливней 95-го процентиля в общую сумму осадков (в), доли покрытия небосвода кучево-дождевыми облаками днем (г), повторяемости дней с грозой (д), повторяемости дней с градом (е), повторяемости дней с максимальной скоростью ветра >20 м/с (ж) и 25 м/с (з).

Для рисунков а—е тренды рассчитаны для 1966—2020 гг., для рисунков ж, з — для 1977—2020 гг. Крупными кружками показаны статистически значимые тренды на уровне 95%.

тистически значимым трендом одного знака) отмечены на юге европейской части России и юге Урала.

Статистически значимый рост экстремальных осадков (любого типа) на большей части России и сокращение на юге Урала и в Нижнем Поволжье отмечались ранее в работе [12]. Увеличение количества сильных летних осадков на европейской части России также сопровождается ростом (хотя и статистически не значимым) речного стока во время паводочных наводнений [52]. На юге европейской части России, в том числе на побережье Черного моря, в теплый период проявляются разнонаправленные тенденции экстремальных осадков на соседних станциях [12], отмечаемые на фоне общего сокращения осадков летом и их увеличения в переходные сезоны [2].

Выявленное учащение экстремальных ливней в целом соответствует существенному увеличению числа событий с сильными осадками, нанесших значительный ущерб экономике и населению [10], как вследствие сильных ливней (30 мм осадков за 1 ч), так и очень сильных дождей (50 мм за 12 ч). Однако база данных о таких событиях [15], представляя важный источник информации для оценки уязвимости регионов к опасным явлениям, характеризуется временной неоднородностью. В частности, одни и те же по сути события в разных регионах могут трактоваться как одно или как несколько явлений. Например, 9 июля 2011 г. в г. Казань (метеорологическая станция № 27595) за 12 ч зафиксировано 68,7 мм осадков, при этом за 1 ч выпало 54 мм осадков (восстановлено по данным плувиографа [27]). Одно событие дождя в этот день удовлетворяло двум критериям (сильный ливень и очень сильный дождь) и занесено в базу данных [15] и как “очень сильный дождь” и как “сильный ливень”. При этом, например, событие сильных осадков в Коломне (№ 27625) 15 июня 2012 г., когда выпало 87,2 мм осадков за 12 ч и 69,9 мм за 1 ч, занесено в базу только как “очень сильный дождь”, а событие сильных осадков в Рязани (№ 27730) 25 июля 2001 г. (выпало 73,6 мм за 12 ч и 57,5 за 1 ч) — только как “сильный ливень”. Обнаружены и другие подобные примеры разной трактовки однотипного события, что указывает на неоднородность данной базы и на необходимость ряда допущений при использовании этих данных для оценки межгодовой изменчивости КОЯП.

Наблюдаемое в большинстве районов России увеличение доли экстремальных ливней в общей сумме осадков сопровождается удлинением сухого периода между выпадением осадков [75] с положительным трендом 3—6% за 10 лет для 1966—2012 гг. [12]. При этом сокращение повторяемости осадков происходит в первую очередь из-за обложных осадков [36]. Стоит отметить, что общая сумма осадков изменяется с меньшей скоростью, чем интенсивность осадков и вклад экстремальных ливней [36], в частности для 1976—2020 гг. тренд годовой суммы осадков для России составил 2,2% за 10 лет [9]. Для территории США на основе численного моделирования с явным разрешением конвекции показано, что ожидаемое вследствие глобального изменения климата уменьшение повторяемости дождей в теплое время года связано с уменьшением повторяемости событий слабых осадков (2 мм в день), при этом сильные осадки (10 мм) отмечаются чаще [42]. По-видимому, похожие тенденции можно ожидать и

для регионов Северной Евразии. Так, результаты расчетов с глобальными и региональными моделями демонстрируют для ближайших десятилетий сохранение тенденций к усилению экстремальных осадков и интенсивности осадков и к одновременному удлинению периода без осадков [22, 43]. При этом удлинение периода без осадков ожидается к югу от 60 с. ш., сокращение — к северу [22], связанное со смещением сюда траекторий движения внетропических циклонов [19]. Также важную роль в установлении того или иного характера зависимости экстремальных осадков от температуры в разных регионах Северной Евразии играет влажность воздуха [28].

Наряду с увеличением количества ливневых осадков на территории России отмечается рост доли небосвода, занятой кучево-дождевыми облаками (рис. 1з), и числа грозовых дней (рис. 1д), более выраженный на юге Сибири и Дальнего Востока, что согласуется с полученными ранее результатами [39]. Высокая согласованность числа дней с грозой и с конвективными осадками отмечена ранее на основе локальной модели конвективного облака и данных реанализа [5]. На фоне общего увеличения числа дней с грозой выявлен ряд регионов с разнонаправленными тенденциями, в частности значимые тренды по сокращению числа дней с грозой демонстрирует ряд станций на европейской части России и Дальнем Востоке. В целом отмечается общее удлинение грозового сезона [6, 39], главным образом, из-за более раннего начала грозовой активности весной [6].

Стоит отметить, что повторяемость грозовых дней не позволяет в полной мере оценить молниевую активность (в частности, число молниевых вспышек на определенной площади). Достаточно надежным индикатором интенсивности конвекции, в том числе молниевой активности, является высота конвективных облаков [1, 11, 72]. Для региона Северной Евразии выявлен статистически значимый рост верхней границы облаков глубокой конвекции, рассчитанной по спутниковым данным MODIS (рис. 2а), скорость которого составляет около 280 м/10 лет днем и 330 м/10 лет ночью. Это более чем в 2 раза превышает скорость увеличения высоты тропопаузы, отмечаемого над большей частью районов Северной Евразией (за исключением севера Сибири) по данным радиозондов [14] и систем реанализа [73]. Рост высоты конвективных облаков говорит об общей интенсификации грозовой активности в регионах Северной Евразии. Это подтверждается и другими данными, в частности данными грозопеленгации, на основе которых отмечено увеличение числа молниевых вспышек как в высоких широтах в целом [51], так и в отдельных российских регионах, например в Якутии [67].

Существующие источники данных не дают возможности сделать какие-либо однозначные выводы об изменении градовой активности на территории России: подавляющее большинство станций демонстрируют незначимые тренды повторяемости града (рис. 1е), при этом учитываются события выпадения града любого размера — как мелкого, так и крупного. Информация о размере града является фрагментарной и неоднородной (в частности, она поступает в виде телеграмм “Шторм” далеко не для каждого явления). С учетом ограничения существующих данных целесообразно оценивать повторяемость не самих событий града, а условий атмосферы, характерных для формирования крупного града [57, 60].

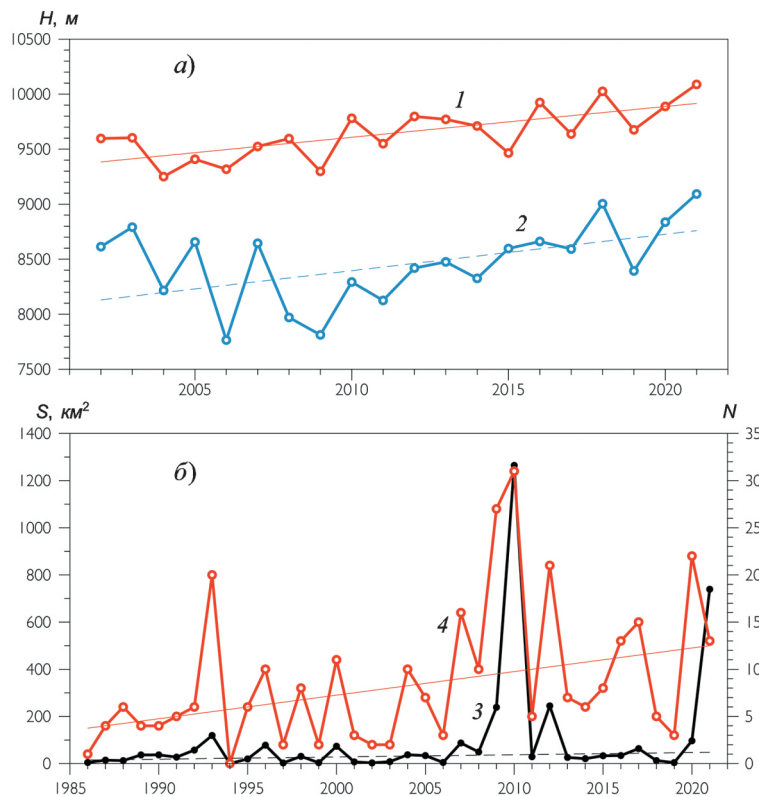


Рис. 2. Межгодовые изменения высоты облаков глубокой конвекции над Северной Евразией днем (1) и ночью (2) в июле по спутниковым данным MODIS “Terra” (а) и межгодовые изменения площади шкваловых и смерчевых ветровалов (для ветровалов с площадью 1 км^2) в лесной зоне европейской части России (3), а также числа N вызвавших их КОЯП (4) по расширенным данным [65] (б).

Показано линейное приближение изменений, сплошными линиями показан статистически значимый тренд на уровне 99%, штриховыми — на уровне 90%.

С учетом редкости и характерного масштаба сильных шквалов ($>25 \text{ м/с}$) и смерчей оценка их долгопериодной изменчивости затруднительна по данным станционных наблюдений. В работе [25] показана принципиальная невозможность использования станционных наблюдений для корректного воспроизведения даже характерного числа смерчей, не говоря уже об их изменчивости. При этом увеличение числа смерчей в последние годы, отмеченное в работах [25, 37], является, по всей видимости, инструментальным и связано с увеличением объема информации. По данным однородных наблюдений за максимальной скоростью ветра на метеорологических станциях отмечаются достаточно слабые изменения повторяемости дней со скоростью ветра 20 м/с (рис. 1ж), преимущественно отрицательные, при этом изменения значимы на востоке европейской части России, на юге Сибири и на побережье морей Тихого океана. Наибольшая согласованность отмечается на юге Сибири, где на большинстве станций наблю-

дается отрицательный значимый тренд ветровых событий в теплое время года (до -2% за 10 лет). При этом для событий со штормовым ветром (25 м/с) тренды по данным станций незначимы (рис. 1з).

Мерой интенсивности шкваловых и смерчевых событий в лесной зоне может служить площадь связанных с ними сплошных ветровалов [64]. Для лесной зоны европейской части России с конца 1980-х годов (рис. 2б) отмечается значимый рост как числа конвективных штормов, вызвавших смерчевые и шкваловые ветровалы (величина тренда составляет 2,5 события в десятилетие), так и суммарной площади этих ветровалов ($9,3 \text{ км}^2/10 \text{ лет}$). Отмечается существенная межгодовая изменчивость площади ветровалов, в частности выделяются 2010 и 2021 гг., когда на западной периферии блокирующих антициклонов формировались так называемые события “деречо” — долгоживущие шквалы со временем жизни до 8 ч, которые стали причиной ветровалов длиной более 500 км и средней шириной около 20 км [38]. Подобные события зарегистрированы на территории России впервые.

Оценку долгопериодной изменчивости площади ветровалов и числа вызвавших их конвективных штормов целесообразно провести в дальнейшем и для лесных регионов Сибири и Дальнего Востока. Это позволит надежнее оценить тренды экстремальных событий в этих регионах. Однако для районов с лесистостью $<50\%$ подобный анализ не будет информативен [63]. При этом важно учитывать повышение уязвимости древостоя к ветровому воздействию в том случае, когда сильный ветер сопровождается выпадением интенсивных осадков [48]. К концу XXI в. глобальные климатические модели показывают для Северной Евразии учащение комплексных событий с сильным ветром и сильными осадками (оба отвечают 99-му процентилю), более сильное при более агрессивном сценарии антропогенных выбросов [61].

В последнее время диагностика наблюдаемых и ожидаемых изменений повторяемости опасных конвективных штормов и сопутствующих им КОЯП осуществляется с использованием индексов конвективной неустойчивости, оцененных на основе данных радиозондирования (например, [16, 70]), систем реанализа (например, [7, 69, 70]) и расчетов с глобальными и региональными климатическими моделями (например, [21, 24, 32, 53, 58]), где, в частности, анализируются как изменения различных квантилей распределения индексов, так и повторяемости превышения определенных пороговых значений. Например, пороговыми значениями могут служить 150 Дж/кг для CAPE и $400 \text{ м}^2/\text{с}^2$ для WMAXSHEAR, при превышении которых отмечается развитие, соответственно, умеренных или сильных КОЯП [70].

Значения индексов конвективной неустойчивости, рассчитанных по данным реанализа последнего поколения ERA5 за 1979—2020 гг., изменяются разнонаправленно в разных регионах России (рис. 3, 4). В частности, отмечается ослабление конвективной активности на юге европейской части России и Урала, где выявлено сокращение как средних значений CAPE (и производных индексов WMAXSHEAR и $P - \text{CAPE}$) (рис. 3), так и повторяемости критических значений индексов (рис. 4). Данное снижение согласуется с результатами, полученными в работе [68], где индексы конвективной неустойчивости рассчитаны на основе данных ERA5 с более высоким вертикальным разрешением (на основе сигма-уровней). Уменьшение $P - \text{CAPE}$ в целом согласуется с уменьшением повторяемости гро-

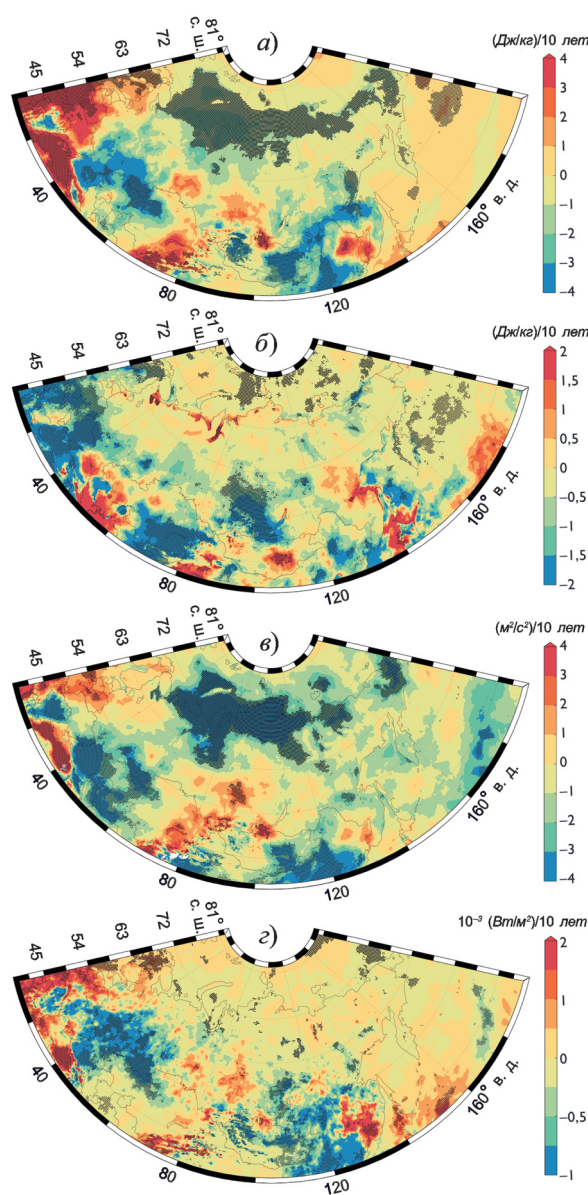


Рис. 3. Линейный тренд средних для апреля — сентября значений индексов конвективной неустойчивости: CAPE (а), CIN (б), WMAXSHEAR (в), $P-CAPE$ (г), рассчитанных по данным реанализа ERA5 за 1979—2020 гг.

Точками показан статистически значимый тренд на уровне 95%.

зовых дней, выявленным по данным станционных наблюдений (рис. 1д). При этом степень согласованности слабых и разнонаправленных изменений $P-CAPE$, отмеченных в других регионах, с изменениями числа вспышек по данным грозопеленгации [51, 67] и высотой облаков глубокой конвекции (рис. 2а), очевидно, требует дальнейших исследований.

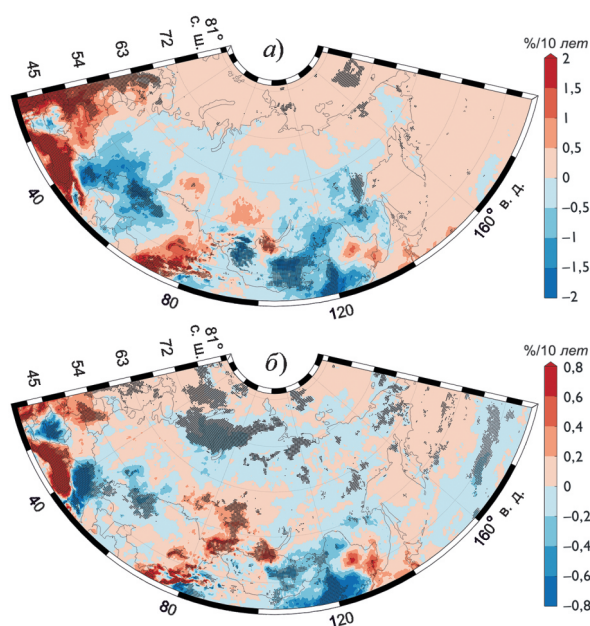


Рис. 4. Линейный тренд повторяемости событий с $\text{CAPE} > 150 \text{ Дж/кг}$ (а), с $\text{WMAXSHEAR} > 400 \text{ м}^2/\text{с}^2$ (б) в теплое время года (апрель — сентябрь) за 1979—2020 гг.

Точками показан статистически значимый тренд на уровне 95%.

В полярных регионах отмечается малое по величине, но значимое уменьшение CAPE. Оно, по-видимому, связано с ослаблением морских холодных вторжений, в которых развивается конвекция в Арктике [56]. Также из-за уменьшения сдвига ветра здесь наблюдается значимое уменьшение WMAXSHEAR. На юге Дальнего Востока проявляются разнонаправленные и по большей части незначимые изменения индексов конвективной неустойчивости.

На побережье Черного моря и на юге Сибири отмечены положительные тренды индексов CAPE и WMAXSHEAR и их критических значений, которые указывают на увеличение вероятности развития КОЯП, в том числе интенсивных, в данных регионах. При этом рост доступной конвективной потенциальной энергии здесь сопровождается усилением конвективного подавления (индекс CIN обычно выражается в отрицательных величинах, поэтому отрицательный тренд говорит об общем усилении конвективного подавления) (рис. 3в), что может приводить к условиям развития взрывной конвекции. В частности, сочетание достаточно низких по модулю значений CIN ($> -50 \text{ Дж/кг}$) и высоких значений CAPE хотя и способствует развитию конвекции, но ведет к формированию умеренных по интенсивности КОЯП. Однако большие по модулю значения CIN (отвечающие значениям до -200 Дж/кг) в сочетании с высокими значениями CAPE при определенных условиях (при преодолении задерживающего слоя) приводят к взрывному развитию конвекции и формированию особенно интенсивных КОЯП

[59]. В частности, подобные события могут реализовываться при определенных циркуляционных условиях, как, например, было в июле 2012 г. в районе г. Крымск [54]. Идеализированные модельные эксперименты показывают, что основной причиной увеличения CAPE и уменьшения CIN в Черноморском регионе является потепление Черного моря [3, 74]. Определение причин увеличения интенсивности конвекции на юге Сибири (отмечаемого также в работах [6, 20]) заслуживает дальнейшего исследования.

Интерес также представляет изучение причин ослабления конвекции на юге Европейской России, особенно учитывая, что глобальные климатические модели не выявляют таких региональных особенностей, демонстрируя для XXI в. для всей территории России увеличение CAPE и CIN (по модулю) при дальнейшем повышении глобальной температуры [32, 53]. В частности, на интенсивность развития мезомасштабных конвективных систем, формирующих интенсивные КОЯП, существенное влияние оказывают аэрозоли [33], региональные тренды которых недостаточно корректно воспроизводятся в глобальных климатических моделях [34].

Заключение

В работе проведен анализ изменений повторяемости и интенсивности конвективных опасных явлений погоды в регионах России на основе данных наземных и спутниковых наблюдений и данных реанализа для последних десятилетий. Результаты анализа указывают на общую интенсификацию КОЯП в большинстве регионов России. Ослабление КОЯП отмечается на Южном Урале и в регионах юга европейской части России (кроме Черноморского побережья). Повторяемость умеренных КОЯП имеет тенденцию к уменьшению, а сильных — к увеличению. Данный вывод, а также ряд отмеченных региональных особенностей изменений характеристик КОЯП требуют дальнейшего уточнения, в том числе на основе численных экспериментов с конвективно-разрешающими моделями, включая оценку роли локальных и глобальных процессов в этих изменениях.

Полученные результаты можно использовать для оценки рисков изменений климата, в частности рисков, связанных с формированием КОЯП, ожидаемое изменение интенсивности и повторяемости которых следует принимать во внимание при разработке планов адаптации российских регионов и отраслей к изменению климата.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (анализ станционных данных и индексов конвективной неустойчивости — при поддержке проекта № 18-77-10076, анализ спутниковых данных — при поддержке проекта № 21-17-00012).

Литература

1. Алексеева А. А. Способы оценки максимальной конвективной скорости в диагнозе и прогнозе опасных конвективных явлений погоды. — Гидрометеорологические исследования и прогнозы, 2020, т. 376, с. 6—22.
2. Алешина М. А., Торопов П. А., Семенов В. А. Изменения температурно-влажностного режима Черноморского побережья Кавказа в период 1982—2014 гг. — Метеорология и гидрология, 2018, № 4, с. 41—53.
3. Алешина М. А., Семенов В. А., Чернокульский А. В. Исследование роли глобальных и региональных факторов в изменении экстремальности летних осадков на Черноморском побережье Кавказа по результатам экспериментов с моделью климата. — Фундаментальная и прикладная климатология, 2019, т. 3, с. 59—75.
4. Булыгина О. Н., Веселов В. М., Александрова Т. М., Коршунова Н. Н. Атмосферные явления на метеорологических станциях России (сроки). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620081, 2014.
5. Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Ефимов С. В., Носова А. М., Печенкин А. А. Исследование ливневой и грозовой активности на территории России с использованием численной модели конвективного облака и данных реанализа. — Метеорология и гидрология, 2013, № 1, с. 32—43.
6. 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.
7. 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.
8. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. — М., Росгидромет, 2020, 97 с.
9. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. — М., Росгидромет, 2021, 104 с.
10. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. — М., Росгидромет, 2017, 106 с.
11. Елисеев А. В., Мохов И. И., Чернокульский А. В. Влияние молниевой активности и антропогенных факторов на крупномасштабные характеристики природных пожаров. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2017, т. 53, № 1, с. 3—14.
12. Золина О. Г., Булыгина О. Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России. — Фундаментальная и прикладная климатология, 2016, т. 1, с. 84—103.
13. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. — М., Физматлит, 2006, 816 с.
14. Козлова Л. Ф., Стерин А. М. Исследование многолетней изменчивости параметров тропопаузы над территорией РФ по радиозондовым данным. — Труды ВНИИГМИ-МЦД, 2014, т. 178, с. 47—60.
15. Коршунов А. А., Шаймарданов В. М., Шаймарданов М. З., Шамин С. И. Повторяемость опасных гидрометеорологических явлений, нанесших социально-экономический ущерб в 1998—2017 гг. — Метеорология и гидрология, 2019, № 11, с. 13—19.
16. Курганский М. В., Чернокульский А. В., Мохов И. И. Смерч под Ханты-Мансийском: пока исключение или уже симптом? — Метеорология и гидрология, 2013, № 8, с. 40—50.
17. Мохов И. И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. — Вестник РАН, 2022, т. 92, № 1, с. 3—14.
18. Мохов И. И., Акперов М. Г. Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2006, т. 42, с. 467—475.
19. Мохов И. И., Чернокульский А. В., Акперов М. Г., Дюфрен Ж.-Л., Ле Трет Э. Изменения характеристик циклонической активности и облачности в атмосфере внетропических широт северного полушария по модельным расчетам в сопоставлении с данными реанализа и спутниковыми данными. — Доклады АН, 2009, т. 424, № 3, с. 393—397.
20. 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.
21. Торопова М. Л., Русин И. Н. Воспроизведение стратификации атмосферы с целью прогноза конвективных явлений при помощи мезомасштабной модели WRF-ARW. — Труды ГГО, 2019, т. 593, с. 160—176.
22. Хлебникова Е. И., Рудакова Ю. Л., Школьник И. М. Изменение режима атмосферных осадков на территории России: результаты регионального климатического моделирования и данные наблюдений. — Метеорология и гидрология, 2019, № 7, с. 5—16.
23. Чернокульский А. В., Козлов Ф. А., Золина О. Г., Булыгина О. Н., Семенов В. А. Климатология осадков разного генезиса в Северной Евразии. — Метеорология и гидрология, 2018, № 7, с. 5—18.

24. Чернокульский А. В., Курганский М. В., Мохов И. И. Анализ изменений условий смерчегенеза в Северной Евразии с использованием простого индекса конвективной неустойчивости атмосферы. — Доклады АН, 2017, т. 477, № 6, с. 722—727.
25. Чернокульский А. В., Курганский М. В., Мохов И. И., Шихов А. Н., Ажигов И. О., Селезнева Е. В., Захарченко Д. И., Антонеску Б., Кюне Т. Смерчи в российских регионах. — Метеорология и гидрология, 2021, № 2, с. 17—34.
26. Чочаев А. Б., Михайловский Ю. П. Анализ развития и взаимодействия ячеек в грозоградовых облаках. — Труды ГГО, 2017, вып. 586, с. 93—116.
27. Швець Н. В. Интенсивность осадков: методы измерений, базы данных наблюдений, использование данных интенсивности осадков в исследовании климата и для решения прикладных задач. — Труды ВНИИГМИ-МЦД, 2020, т. 186, с. 69—89.
28. Aleshina M. A., Semenov V. A., and Chernokulsky A. V. A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data. — Environ. Res. Lett., 2021, vol. 16, p. 105004.
29. Baum B. A., Menzel W. P., Frey R. A., et al. MODIS cloud-top property refinements for Collection 6. — J. Appl. Meteorol. and Climatol., 2012, vol. 51, pp. 1145—1163.
30. Brooks H. E., Doswell C. A. III, Zhang X., et al. A century of progress in severe convective storm research and forecasting. — Meteorol. Monographs, 2019, vol. 59, pp. 18.1—18.41.
31. Chen B. and Liu Z. Global water vapor variability and trend from the latest 36-year (1979 to 2014) data of ECMWF and NCEP reanalyses, radiosonde, GPS, and microwave satellite. — J. Geophys. Res. Atmos., 2016, vol. 121, pp. 11442—11462.
32. Chen J., Dai A., Zhang Y., and Rasmussen K. L. Changes in convective available potential energy and convective inhibition under global warming. — J. Climate, 2020, vol. 33, pp. 2025—2050.
33. Chen Q., Fan J., Yin Y., and Bin Han. Aerosol impacts on mesoscale convective systems forming under different vertical wind shear conditions. — J. Geophys. Res. Atmos., 2020, vol. 125, p. e2018JD030027.
34. Cherian R. and Quaas J. Trends in AOD, clouds, and cloud radiative effects in satellite data and CMIP5 and CMIP6 model simulations over aerosol source regions. — Geophys. Res. Lett., 2020, vol. 47, p. e2020GL087132.
35. Chernokulsky A. and Esau I. Cloud cover and cloud types in the Eurasian Arctic in 1936—2012. — Int. J. Climatology, 2019, vol. 39, pp. 5771—5790.
36. Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., et al. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades. — Environ. Res. Lett., 2019, vol. 14, p. 045001.
37. Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., et al. Tornadoes in northern Eurasia: From the middle age to the information era. — Mon. Wea. Rev., 2020, vol. 148, pp. 3081—3110.
38. Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., et al. Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010. — Atmos. Res., 2022, vol. 267, p. 105928.
39. Chernokulsky A. V., Bulygina O. N., and Mokhov I. I. Recent variations of cloudiness over Russia from surface daytime observations. — Environ. Res. Lett., 2011, vol. 6, p. 035202.
40. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. /V. Masson-Delmotte, P. Zhai, and A. Pirani (eds.). — Cambridge University Press, 2021.
41. Colby F. P. Convective inhibition as a predictor of convection during AVE-SESAME II. — Mon. Wea. Rev., 1984, vol. 112, pp. 2239—2252.
42. Dai A., Rasmussen R. M., Liu C., Ikeda K., and Prein A. F. A new mechanism for warm-season precipitation response to global warming based on convection-permitting simulations. — Climate Dynamics, 2017, vol. 55, pp. 343—368.
43. Donat M. G., Lowry A. L., Alexander L. V., O’Gorman P. A., and Maher N. More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions. — Nature Climate Change, 2016, vol. 6, pp. 508—513.
44. Doswell C. A. III, Brooks H. E., and Maddox R. A. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. — Weather and Forecasting, 1996, vol. 11, pp. 560—581.
45. Doswell C. A. III and Schultz D. M. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. — E-J. of Severe Storms Meteorol., 2006, vol. 1, No. 3, pp. 1—24.
46. Dotzek N. and Price C. Lightning characteristics of extreme weather events. /In: Lightning Principles, Instruments and Applications. H. D. Betz, U. Schumann, and P. Laroche (eds.). — 2009, pp. 487—508.
47. Eastman R. and Warren S. G. A 39-yr survey of cloud changes from land stations worldwide 1971–2009: Long-term trends, relation to aerosols, and expansion of the tropical belt. — J. Climate, 2013, vol. 26, pp. 1286—1303.
48. Gardiner B., Blennow K., Carnus J.-M., Fleischer P., Ingermarsson F. Destructive Storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts. — DG Environment, 2010, 139 p.
49. Groenemeijer P., Pucik T., Holzer A. M., et al. Severe convective storms in Europe: Ten years of research and education at the European Severe Storms Laboratory. — Bull. Amer. Meteorol. Soc., 2017, vol. 98, pp. 2641—2651.

50. **Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al.** The ERA5 global reanalysis. — *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 1999—2049.
51. **Holzworth R. H., Brundell J. B., McCarthy M. P., et al.** Lightning in the Arctic. — *Geophys. Res. Lett.*, 2021, vol. 48, p. e2020GL091366.
52. **Kireeva M. B., Rets E. P., Frolova N. L., et al.** Occasional floods on the rivers of Russian Plain in the 20th–21st centuries. — *Geography, Environment, Sustainability*, 2020, vol. 13, No. 2, pp. 84—95.
53. **Lepore C., Abernathey R., Henderson N., Allen J. T., and Tippet M. K.** Future global convective environments in CMIP6 models. — *Earth's Future*, 2021, vol. 9, p. e2021EF002277.
54. **Meredith E. P., Semenov V. A., Maraun D., Park W., and Chernokulsky A. V.** Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme. — *Nature Geoscience*, 2015, vol. 8, pp. 615—619.
55. **Moncrieff M. W. and Miller M. J.** The dynamical structure of two-dimensional steady convection in constant vertical shear. — *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 1976, vol. 104, pp. 373—394.
56. **Narizhnaya A. I., Chernokulsky A. V., Akperov M. G., et al.** Marine cold air outbreaks in the Russian Arctic: Climatology, interannual variability, dependence on sea-ice concentration. — *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 606, No. 1, p. 012039.
57. **Pucik T., Castellano C., Groenemeijer P., et al.** Large hail incidence and its economic and societal impacts across Europe. — *Mon. Wea. Rev.*, 2019, vol. 147, pp. 3901—3916.
58. **Pucik T., Groenemeijer P., and Radler A. T.** Future changes in European severe convection environments in a regional climate model ensemble. — *J. Climate*, 2017, vol. 30, pp. 6771—6794.
59. **Rasmussen K. L., Prein A. F., Rasmussen R. M., Ikeda K., and Liu C.** Changes in the convective population and thermodynamic environments in convection-permitting regional climate simulations over the United States. — *Climate Dynamics*, 2020, vol. 55, pp. 383—408.
60. **Raupach T. H., Martius O., Allen J. T., et al.** The effects of climate change on hailstorms. — *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, vol. 2, pp. 213—226.
61. **Ridder N. N., Ukkola A. M., Pitman A. J., and Perkins-Kirkpatrick S. E.** Increased occurrence of high impact compound events under climate change. — *J. Climate and Atmos. Sci.*, 2022, vol. 5, No. 3, pp. 1—8.
62. **Romps D. M., Seeley J. T., Vollaro D., and Molinari J.** Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. — *Science*, 2014, vol. 346, pp. 851—854.
63. **Shikhov A. and Chernokulsky A. A.** A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe. — *Remote Sens. Environ.*, 2018, vol. 204, pp. 553—567.
64. **Shikhov A., Chernokulsky A., Kalinin N., Bykov A., and Pischalnikova E.** Climatology and formation environments of severe convective windstorms and tornadoes in the Perm region (Russia) in 1984–2020. — *Atmosphere*, 2021, vol. 12, No. 11, p. 1407.
65. **Shikhov A. N., Chernokulsky A. V., Azhigov I., and Semakina A.** A satellite-derived database for stand-replacing windthrow events in boreal forests of European Russia in 1986–2017. — *Earth System Science Data*, 2020, vol. 12, pp. 3489—3513.
66. **Stuecker M. F., Bitz C. M., Armour K. C., et al.** Polar amplification dominated by local forcing and feedbacks. — *Nature Climate Change*, 2018, vol. 8, pp. 1076—1081.
67. **Tarabukina L. and Kozlov V.** Seasonal variability of lightning activity in Yakutia in 2009–2019. — *Atmosphere*, 2020, vol. 11, No. 9, p. 918.
68. **Taszarek M., Allen J. T., Brooks H. E., Pilguy N., and Czernecki B.** Differing trends in United States and European severe thunderstorm environments in a warming climate. — *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2021, vol. 102, pp. E296—E322.
69. **Taszarek M., Allen J. T., Pucik T., Hoogewind K. A., and 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. — *J. Climate*, 2020, vol. 33, pp. 10263—10286.
70. **Taszarek M., Brooks H. E., and Czernecki B.** Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe. — *Mon. Wea. Rev.*, 2017, vol. 145, pp. 1511—1528.
71. **Trenberth K. E., Dai A., Rasmussen R. M., and Parsons D. B.** The changing character of precipitation. — *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2003, vol. 84, pp. 1205—1218.
72. **Ushio T., Heckman S. J., Boccipio D. J., and Christian H. J.** A survey of thunderstorm flash rates compared to cloud top height using TRMM satellite data. — *J. Geophys. Res.*, 2001, vol. 106, pp. 24089—24095.
73. **Xian T. and Homeyer C. R.** Global tropopause altitudes in radiosondes and reanalyses. — *Atmos. Chem. and Phys.*, 2019, vol. 19, pp. 5661—5678.
74. **Yarinich Y. I., Chernokulsky A. V., Semenov V. A., and Latif M.** Role of sea surface warming in convective activity over Europe and Northern Eurasia: Estimates with sensitivity model experiments. — *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 386, No. 1, p. 012051.
75. **Zolina O., Simmer C., Belyaev K., Gulev S. K., and Koltermann P.** Changes in the duration of European wet and dry spells during the last 60 years. — *J. Climate*, 2013, vol. 26, pp. 2022—2047.