

УДК 551.583

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА И ОСАДКОВ В КОНЦЕ XX И В НАЧАЛЕ XXI ВЕКОВ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНЫХ ЗОНАХ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА ERA5

© 2023 г. И. В. Железнова^а, *, Д. Ю. Гущина^а, **

^аМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, 199911 Россия

*e-mail: ijeleznova@gmail.com

**e-mail: dasha155@mail.ru

Поступила в редакцию 27.02.2023 г.

После доработки 19.06.2023 г.

Принята к публикации 26.06.2023 г.

Глобальный рост температуры на планете сопровождается увеличением частоты возникновения экстремальных погодных событий, которые могут привести к значительным нарушениям в течении обменных процессов в растениях и функционировании растительных сообществ. В зависимости от типа растительности и климатических условий степень и характер такого влияния может значительно изменяться. Поэтому задачей настоящей работы было выявить районы с различными типами растительных сообществ, наиболее подверженные воздействию экстремальных температур и осадков в последние десятилетия. Для выявления регионов с экстремальными значениями температуры и осадков выбран метод оценки частоты превышения заданного порога (менее 5% квантиля или более 95% квантиля) для подобранных теоретических функций распределения плотности вероятности для рядов температуры воздуха и осадков. Для всего Земного шара рассчитано количество случаев превышения порога экстремальности, проанализирована их пространственно-временная изменчивость в различные сезоны года и в первые десятилетия XXI века по сравнению с концом XX века. Выявлены регионы с различными типами растительных сообществ, в которых отмечается наиболее выраженное усиление экстремальности режима температуры и осадков в условиях меняющегося климата.

Ключевые слова: экстремальные явления погоды, растительные сообщества, температура воздуха, атмосферные осадки, изменение климата

DOI: 10.31857/S0002351523050139, **EDN:** ANDMWR

1. ВВЕДЕНИЕ

Глобальный рост температуры на планете сопровождается увеличением частоты возникновения экстремальных погодных событий [Parmesan et al., 2022; Seneviratne et al., 2021]. Экстремальные явления погоды, проявляющиеся в резких температурных колебаниях, дефиците или избытке атмосферных осадков могут привести к значительным нарушениям в течении обменных процессов в растениях и функционировании растительных сообществ [Reichstein et al., 2013; Zscheischler et al., 2014a].

Метеорологические условия оказывают существенное влияние на рост, развитие и продуктивность наземных экосистем, регулируя процессы

транспирации и CO₂ обмена растительных сообществ. Так, засухи и волны жары приводят к увеличению эмиссии диоксида углерода (CO₂) в атмосферу, в то время как более холодные и влажные периоды ассоциируются с ростом поглощения CO₂ наземными экосистемами [Zscheischler et al., 2014b]. В целом ряде работ показано [Reichstein et al., 2013; Zscheischler et al., 2014c; Zscheischler et al., 2014b], что ключевым фактором, определяющим экстремальное уменьшение валовой первичной продукции (GPP), является дефицит осадков. В то же время реакция составляющих углеродного баланса на изменение климата имеет высокую степень неопределенности: повышение температуры с одной стороны увеличивает поглощение CO₂ экосистемами суши [Beer et al., 2010], но также и ассоциируется с интенсификацией почвенного дыхания [Mahecha et al., 2010].

Кроме того, в зависимости от типа растительности и климатических условий степень и харак-

Статья подготовлена на основе доклада, представленного на IV Всероссийской конференции с международным участием “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”, посвященной памяти академика А.М. Обухова (Москва, 22–24 ноября 2022 г.).

тер влияния экстремальных погодных условий на экосистемы может значительно изменяться. Так, экстремальные значения потоков диоксида углерода в тропических лесах более тесно связаны с доступностью воды, тогда как экстремальные значения потоков CO_2 в бореальных лесах в большей степени обусловлены изменениями температуры [Zscheischler et al., 2014b]. В областях с луговой растительностью, также как и в тропических лесах, доминирует влияние дефицита увлажнения на потоки углекислого газа [Li et al., 2016].

Однако, несмотря на то, что основные механизмы воздействия экстремальных климатических событий на растительные сообщества достаточно хорошо изучены, количественная, статистически значимая оценка отклика наземных экосистем на экстремальные погодные события ограничена с одной стороны количеством наблюдаемых экстремальных событий, а с другой — недостатком систематически собираемых данных, в первую очередь по потокам парниковых газов в различных растительных сообществах.

Лишь в небольшом количестве исследований предпринимались попытки определить крупномасштабные закономерности пространственно-временного распределения экстремальных явлений погоды и их эффекта на функционирование растительных сообществ [Zhao and Running, 2010; Zscheischler et al., 2013]. Во многом это обусловлено отсутствием общих критериев для оценки экстремальных воздействий. В некоторых работах предпринимались попытки определить пороговые значения погодных и климатических аномалий, вызывающих существенные изменения в функционировании природных экосистем [Frank et al., 2015; Smith, 2011], но они либо сосредоточены на отдельных регионах, либо в них предложена теоретическая методика и отсутствуют примеры конкретных пороговых значений для отдельных метеорологических параметров, которые могут существенно различаться для географических районов и типов растительных сообществ.

Для развития исследования влияния экстремальных погодных событий на функционирование различных типов растительных сообществ возникает необходимость на первом этапе определить динамику экстремальности климата в течение нескольких десятилетий в глобальном масштабе. Оценки изменчивости режима экстремальных температур [Hansen, Sato, Ruedy, 2012] и осадков [O’Gorman, 2015; Tabari, 2020] уже предпринимались ранее, но с применением сильно различающихся методов и исходных данных. Кроме того, с момента выхода некоторых работ прошло уже довольно много времени, поэтому полученные ранее результаты требуют актуализации с учетом произошедших за последнее десятилетие глобальных климатических изменений. Целью настоящего

исследования является получение глобального пространственного распределения частоты возникновения экстремальных погодных и климатических условий (для температуры воздуха и осадков как ключевых факторов, определяющих режим функционирования растительных сообществ), а также оценка их временной динамики в контексте глобального роста температуры.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

2.1. Данные

Для выявления регионов с экстремальными значениями температуры и осадков были использованы ежемесячные данные глобального реанализа ERA5 [Hersbach et al., 2020] для всего Земного шара с шагом сетки $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ за период 1980–2021 гг. Были использованы данные о температуре воздуха на уровне 2 метра и средней месячной интенсивности осадков. Исходные данные о температуре были переведены из Кельвинов в градусы Цельсия, данные по осадкам преобразованы из единиц интенсивности ($\text{кг}/\text{м}^2 \text{ с}$) в месячные суммы. Рассматривались только узлы сетки, попадающие на сушу.

2.2. Методика

Порог экстремальности температуры воздуха и осадков на первом этапе определялся на основе двух различных статистических подходов:

1) превышение одного среднеквадратического отклонения (± 1 СКО), рассчитанного по полному временному ряду среднемесячных значений температуры воздуха и осадков за период с 1980 по 2021 гг.;

2) превышение 95% (или не достижение 5%) квантиля функции распределения вероятности для тех же величин.

Расчет пороговых значений проводился для всех календарных месяцев отдельно, чтобы выявить значимые отклонения от климатической нормы с учетом годового хода метеорологических параметров.

В качестве функции распределения, на основе которой были рассчитаны квантильные значения, для температуры воздуха было использовано нормальное распределение, для осадков — распределение Вейбулла [Weibull, 1951]. На рис. 1 приведены результаты теста на соответствие выбранных теоретических типов распределения эмпирическому распределению функции вероятностей метеовеличин в каждом узле сетки реанализа. Для температуры воздуха (рис. 1а) области, для которых тест Шапиро-Уилка [Shapiro and Wilk, 1965] отвергает нулевую гипотезу о нормальности распределения, располагаются преимущественно над океанами. Наиболее обширные зоны нахо-

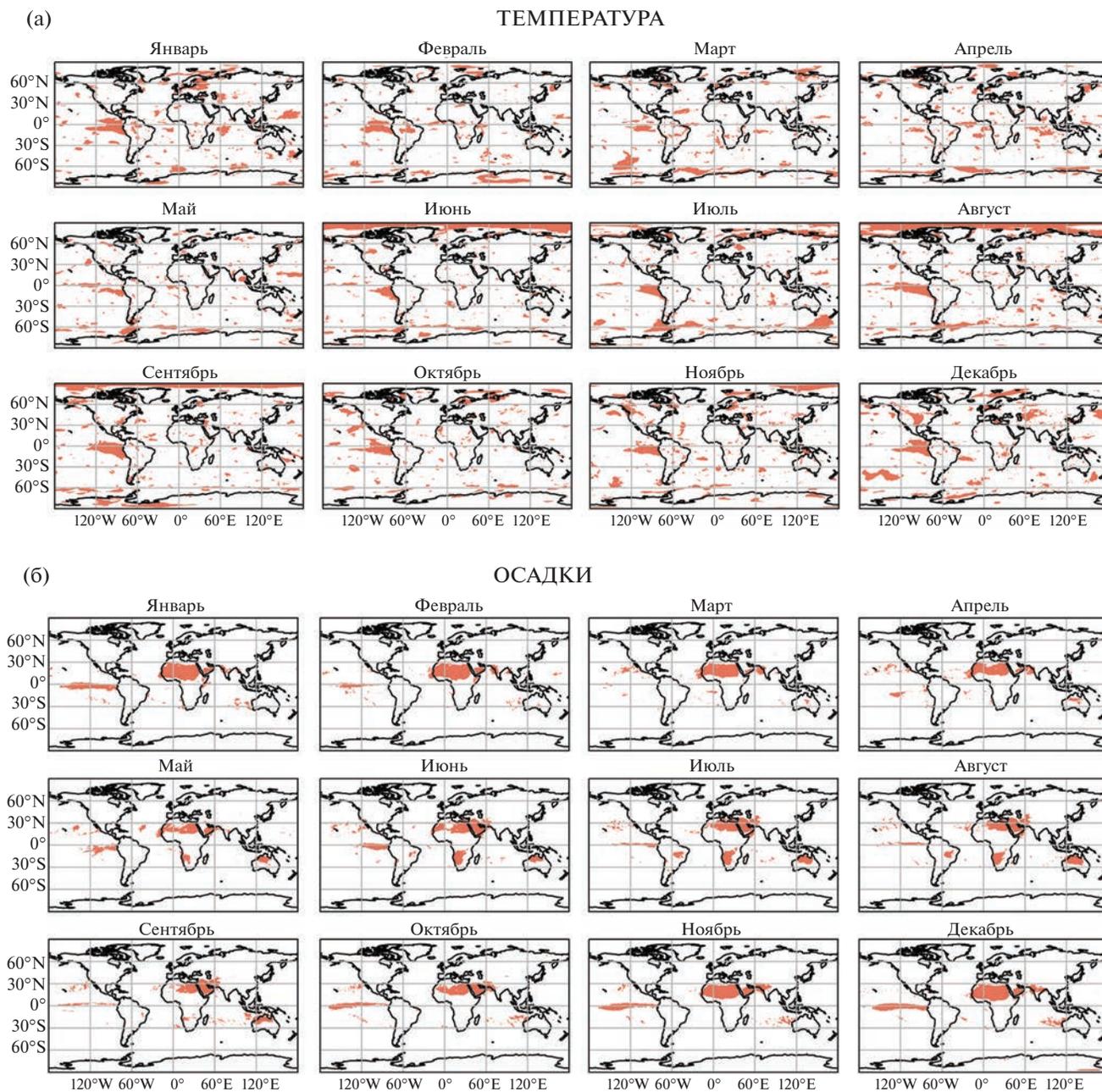


Рис. 1. Области, в которых нулевая гипотеза о соответствии ряда данных выбранной функции распределения отклонена. Для температуры воздуха (а) использовался тест Шапиро-Уилка для оценки соответствия нормальному распределению, для осадков (б) – тест Колмогорова-Смирнова для оценки соответствия распределению Вейбулла.

дятся в зоне распространения явления Эль-Ниньо в Тихом океане и в летние месяцы в Арктике. На суше нормальное распределение для оценки экстремальности температуры воздуха не может быть использовано в небольших по площади районах, локализация которых сильно меняется от месяца к месяцу. Данные об осадках не могут быть аппроксимированы распределением Вейбулла (согласно тесту Колмогорова-Смирнова [Frank, Massey, 1951]) преимущественно в пустынных районах тропических широт (рис. 1б),

где среднегодовое количество осадков крайне мало. В то же время над большей частью континентов распределение Вейбулла может быть использовано для аппроксимации распределения осадков и выделения квантильных значений.

Таким образом, исключая регионы и периоды, когда выбранные функции распределения не могут быть использованы, можно получить обобщенные статистические оценки для сезонов, полугодий и года в целом.

Таблица 1. Коэффициент пространственной корреляции между полями числа случаев экстремальных событий, рассчитанных по двум методам определения порогового значения (превышение СКО и превышение квантиля) за период 1980–2021 гг.

Температура		Осадки	
<5%/<1СКО	>95%/>1СКО	<5%/<1СКО	>95%/>1СКО
0.85	0.86	0.63	0.77

Данные реанализа, даже имеющего хорошее пространственное разрешение, как ERA5, часто недооценивают абсолютные значения метеовеличин для экстремальных событий, а также менее точно воспроизводят поля атмосферных осадков по сравнению с полями температуры воздуха [Lei et al., 2022; Xu et al., 2022]. Однако для месячного масштаба осреднения пространственная структура климатических полей воспроизводится достаточно реалистично, особенно во внетропических широтах [Lavers et al., 2022]. Чтобы избежать недооценки абсолютных значений температуры воздуха и осадков, в настоящем исследовании мы рассматриваем не сами метеорологические параметры, а частоту превышения ими пороговых значений, соответствующих экстремальным условиям. Для каждого узла сетки реанализа, попадающего на сушу, было выявлено число случаев превышения установленного порога экстремальности для температуры воздуха и осадков за исследуемый период.

Для оценки изменения пространственной структуры полей аномалий температуры воздуха и осадков в разные временные периоды и сезоны года был использован коэффициент двумерной корреляции:

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{\left(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2\right) \left(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2\right)}}, \quad (1)$$

где m и n – число точек по двум размерностям (долготе и широте), A_{mn} и B_{mn} – значения двумерных массивов A и B в данном узле сетки, \bar{A} и \bar{B} – средние значения по всем точкам двумерных массивов.

Пространственная структура частоты возникновения экстремальных событий, определенная двумя методами, хорошо согласуется друг с другом. Это подтверждается коэффициентом пространственной двумерной корреляции между полученными полями (табл. 1).

Число случаев экстремальных температур, определенных двумя различными способами, имеет коэффициент двумерной корреляции 0.85–0.86. Корреляция между числом случаев экстремальных осадков, определенных двумя методами, меньше,

чем для температуры, особенно в областях частого возникновения засух (коэффициент корреляции 0.63). Это может быть связано с особенностью функции распределения Вейбулла в области малых значений. При этом критерий превышения 95% квантиля (или недостижения 5% квантиля) оказывается более жестким, чем превышение СКО, и абсолютное количество месяцев с экстремальными значениями, выделенными по распределению вероятностей, за исследуемый период оказывается в 2 раза меньше, чем количество месяцев, когда превышался порог в 1 СКО.

Для дальнейших исследований был выбран метод выделения экстремальных значений на основе превышения квантиля функции распределения, т.к. оценка на основе специально подобранной для каждого параметра функции распределения вероятности более точно учитывает повторяемость экстремальных значений, особенно на “хвостах” распределения. Кроме того, этот критерий оказывается более “жестким” и позволяет выявить наиболее сильные аномалии.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Анализ частоты возникновения экстремальных событий в конце XX (1980–2000) и начале XXI (2001–2021) веков

Первым этапом работы стала оценка изменчивости частоты возникновения экстремальных погодных условий в последние десятилетия. Для этого данные были разделены на 2 периода – конец XX века (1980–2000 гг.) и начало XXI века (2001–2021 гг.). Продолжительность обоих периодов одинакова и составляет 21 год, что позволяет сопоставлять напрямую число месяцев с экстремальными отклонениями в каждом из периодов. На рис. 2 приведены карты числа месяцев с экстремальными значениями температуры воздуха и осадков для всего периода (1980–2021 гг.), а также в течение конца XX и начала XXI века. Тенденция изменения числа случаев экстремальных температур (рис. 2а) хорошо соотносится с глобальным трендом потепления в последние десятилетия: в конце XX века отмечается намного больше экстремально холодных месяцев и намного меньше экстремально теплых, чем в начале XXI века. В начале XXI века – напротив, более редкими становятся месяцы с экстремально низкими температурами и более частыми – с экстремально высокими. Также отмечается изменение локализации областей с максимальным количеством экстремальных событий. Так, например, в конце XX века экстремально холодные события чаще фиксировались на юге и западе Австралии, а в начале XXI века сместились на север континента. Экстремально теплые месяцы в период 1980–2000 гг. более часто отмечались на севере, а в период

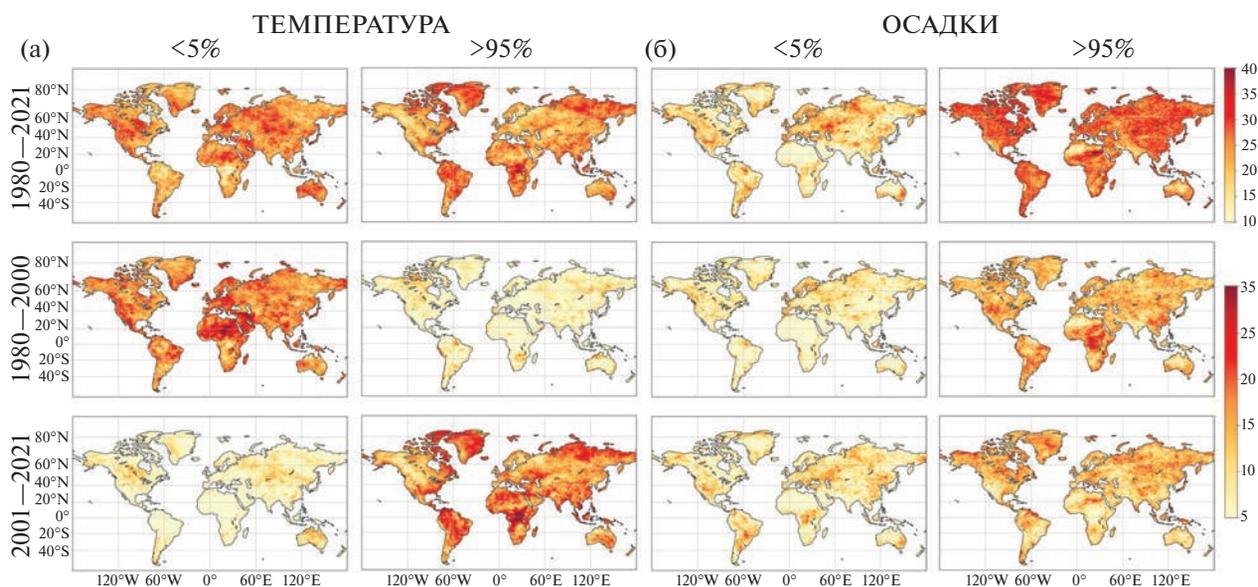


Рис. 2. Число месяцев с экстремальными значениями среднемесячной температуры воздуха (а) и месячных сумм осадков (б) за весь период 1980–2021 гг., в конце XX века (1980–2000 гг.), и в начале XXI века (2001–2021 гг.).

2001–2021 гг. – на юго-востоке Австралии. Аналогичная ситуация наблюдается и на других континентах. Таким образом, хотя общая тенденция изменения числа экстремальных событий в XXI веке связана с трендом глобального роста температуры, пространственное распределение этих событий также изменяется, и области, где чаще формируются экстремальные термические условия, в ряде случаев меняют свою локализацию. Это подтверждает и коэффициент пространственной двумерной корреляции для полей температуры воздуха для конца XX и начала XXI века (табл. 2). Отрицательная корреляционная связь двух полей значима, но не слишком велика (–0.59).

В полях месячных сумм осадков (рис. 2б) тренд проявляется намного слабее: в целом по планете число месяцев с экстремальными осадками от конца XX к началу XXI века меняется незначительно. Однако можно отметить, что в целом за весь рассматриваемый период намного чаще фиксируются ситуации с экстремально сильными осадками по сравнению с экстремально засушливыми месяцами. Также можно отметить сильное изменение локализации областей с максимальным числом экстремальных событий между двумя рассматриваемыми периодами – особенно ярко это заметно для очень слабых осадков. И, если для сильных осадков можно говорить о слабой значимой отрицательной пространственной корреляции между числом экстремальных явлений в конце XX и начале XXI века (–0.49), то для слабых осадков коэффициент корреляции оказывается положительным и не превышает порога значимости (0.35).

3.2. Анализ годового хода частоты возникновения экстремальных событий в различных природных зонах

Следующим этапом исследования стала оценка пространственного распределения частоты возникновения экстремальной температуры воздуха и осадков в отдельные сезоны года (декабрь–январь–февраль, март–апрель–май, июнь–июль–август и сентябрь–октябрь–ноябрь) в конце XX и начале XXI века. При рассмотрении сезонных различий можно выделить несколько регионов с существенным ростом экстремальности в период 2001–2021 гг. по сравнению с 1981–2000 гг. в определенные месяцы года: так, наиболее заметное увеличение частоты случаев экстремально высоких температур отмечается в Северной Евразии (район полуострова Таймыр) в весенний период и в экваториальной Африке осенью. Существенный рост частоты очень холодных событий наблюдается в Центральной Азии в зимние месяцы, а в Канаде и на севере Австралии весной. Наиболее заметное увеличение числа экстремально засушливых событий отмечается на юге ЕТР, а также во внутренних районах экваториальной Африки и Южной

Таблица 2. Коэффициент пространственной корреляции для карт разности числа экстремальных событий в конце XX и начале XXI века

Температура		Осадки	
<5%	>95%	<5%	>95%
–0.59	–0.59	0.35	–0.49

Америки в летние месяцы. Сильные осадки чаще стали наблюдаться в XXI веке по сравнению с XX на территории Сибири весной и на Дальнем Востоке осенью (не показано). При этом важно отметить, что, хотя эти регионы хорошо выделяются на картах для отдельных сезонов, в среднем за год число экстремальных событий в них может не превышать среднее по планете или даже быть ниже. Поэтому для каждого региона при рассмотрении динамики условий экстремальности климата важно оценивать не только частоту возникновения экстремальных температур воздуха и осадков в целом за год, но и учитывать сезонные различия.

Глобальный анализ изменения частоты возникновения экстремальных событий по сезонам показал, что этот параметр отличается высокой степенью пространственной неоднородности. Чтобы понять, можно ли говорить о связи экстремальности климатических условий с типом климата и растительности, нами были выделены регионы, где экстремальные события возникали наиболее часто (в процентах от общей длины ряда данных), а затем выделенные области были сопоставлены с типами климата. Так как задачей исследования было изучение изменений экстремальности климатических условий в различных природных зонах, нами была выбрана классификация климатов Кеппена-Гейгера [Peel, Finlayson, McMahon, 2007], в которой каждый тип климата соотносится с преобладающим в нем типом растительности (рис. 3а). Для каждого типа экстремальных событий (экстремально высокие/низкие температуры воздуха/осадки) были выделены регионы, с максимальным количеством месяцев с экстремальными температурами или осадками, относящиеся к различным типам климата. Для каждой выделенной области были построены графики годового хода числа экстремальных событий, осредненные по всем узлам сетки (рис. 3б). Анализ годового хода учитывал полушарие, в котором находится каждый регион, но, так как большинство выделенных областей расположены в Северном полушарии, в тексте используются названия сезонов для Северного полушария.

Экстремальные температуры воздуха (как высокие, так и низкие) в умеренных и высоких широтах (типы климатов D и F, с преобладанием тундровой и таежной растительности) имеют тенденцию чаще возникать в летние месяцы, а годовой минимум приходится на весну. Экстремально

сильные осадки в этих типах климата не имеют выраженного сезонного хода, а вот очень сухие условия чаще возникают осенью (для климата Dfc, в других климатах групп D и F областей с повышенной повторяемостью засушливых условий не выявлено).

В климатах с повышенной засушливостью (типы климатов B, степные и пустынные регионы) экстремально высокие температуры также чаще отмечаются в летние месяцы, а годовой ход экстремально низких температур имеет два максимума, но сроки их наступления варьируются в зависимости от подтипа климата. Так, например, в пустынях Bwh минимумы повторяемости приходится на май и ноябрь–февраль, а два максимума – на март–апрель и август–сентябрь. Годовой ход экстремальных осадков в засушливых типах климата имеет сложную структуру и сильно зависит от конкретного региона. Намного большая повторяемость экстремально сильных осадков в пустынном климате Bwh по сравнению с другими подтипами климата B обусловлена некорректным применением в этом регионе распределения Вейбулла, как было показано в разделе 2.2.

Для климатов внутритропических и субтропических широт (типы A и C, влажные и переменновлажные леса, широколиственные и смешанные леса, жестколистные субтропические леса) характерен летне-осенний максимум частоты повторяемости экстремально низких температур с локальным минимумом во второй половине лета. Похожая тенденция отмечается для повторяемости очень высоких температур в климатах типа C. Для приэкваториальных широт (климаты A) характерен сложный годовой ход с множеством локальных максимумов и минимумов, сроки наступления которых отличаются в зависимости от локализации области. Повторяемость экстремально слабых осадков в климатах типа A имеет минимум весной и максимум осенью, что, по-видимому, определяется чередованием периодов интенсивного влияния ВЗК и ее смещением в более высокие широты. Экстремально сильные осадки в климатах типа C не имеют выраженного годового хода, в приэкваториальных широтах годовой ход также выражен слабо, с размытым максимумом в летние месяцы и снижением частоты возникновения экстремумов зимой Северного полушария.

Рис. 3. (а) Области с наибольшим числом месяцев с экстремальными температурами воздуха и осадками в % от общего числа месяцев за период 1980–2021 гг., сопоставленные с типами климата по классификации Кеппена-Гейгера (основа для карты климатов взята из [Beck et al., 2018]). Зоны низкой повторяемости экстремальных событий имеют приглушенные цвета, области повышенной частоты экстремальных событий (>3% для температуры и осадков, не достигающих 5% квантиля и >3.5% для осадков, превышающих 95% квантиль) выделены ярким цветом, соответствующим цвету в легенде. Области, выбранные для изучения годового хода частоты возникновения экстремальных событий, выделены черными прямоугольниками. (б) Графики годового хода числа месяцев с экстремальными значениями температуры воздуха и осадков. Цвет графика соответствует цвету области на карте, для которой он был получен.

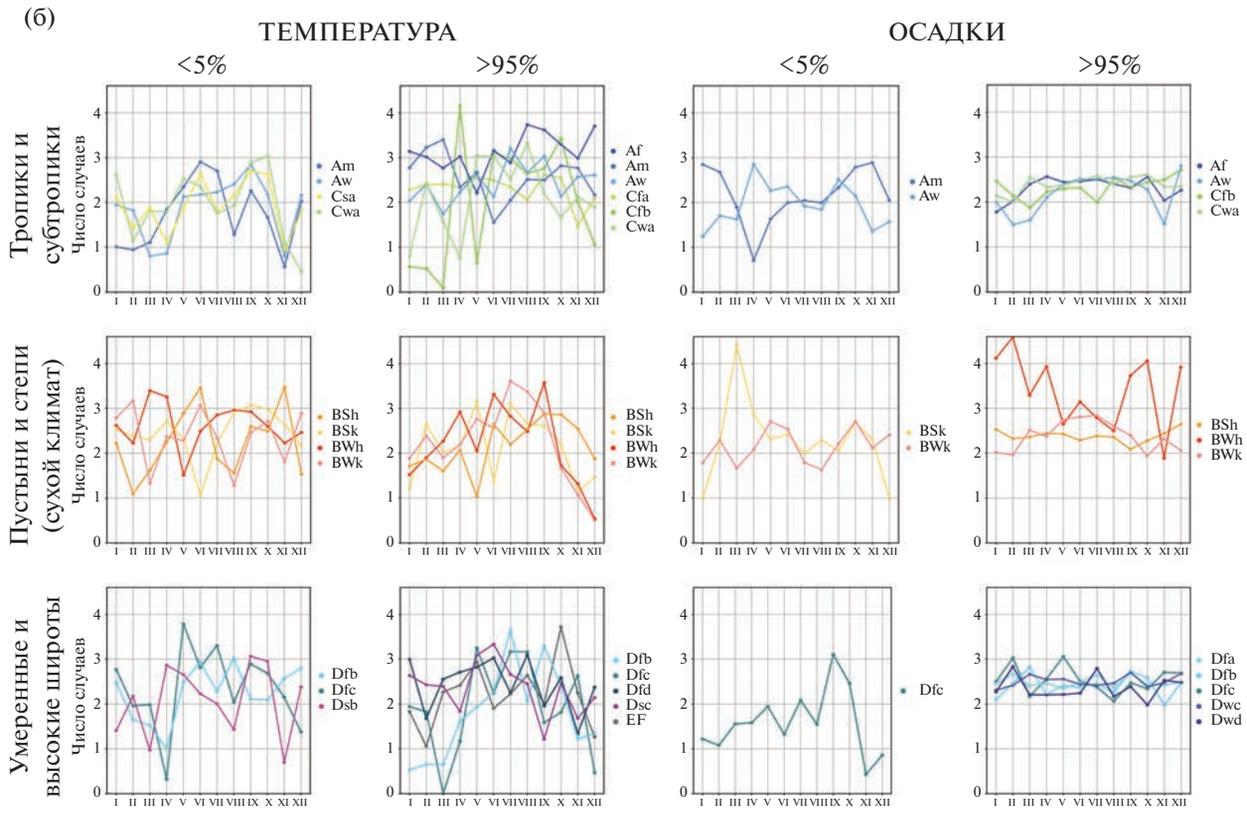
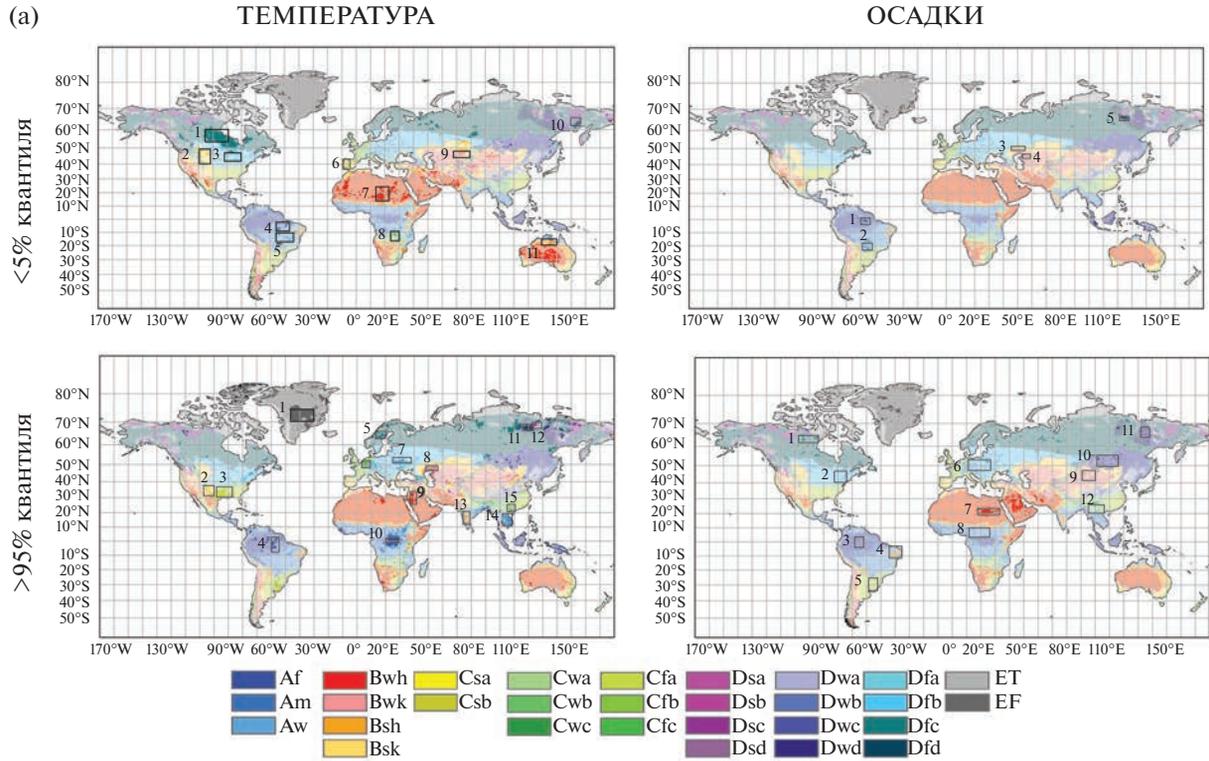


Таблица 3. Коэффициент пространственной корреляции между картами числа экстремальных погодных условий (>95% и <5% квантилей) для года в целом, теплого и холодного полугодия

Период	Температура	Осадки
Год	−0.55	−0.27
Май–октябрь	−0.45	−0.20
Ноябрь–апрель	−0.43	−0.18

Дополнительно было рассмотрено изменение структуры годового хода с конца XX к началу XXI века (не показано). В ряде регионов распределение частоты экстремальных событий по месяцам изменилось очень сильно. Общие тенденции совпадают с выявленными при пространственной оценке изменения числа месяцев с экстремальными условиями за два периода: в XXI веке чаще возникают экстремально высокие температуры, в XX – экстремально низкие. При этом для частоты экстремальных осадков в умеренных и высоких широтах существенных изменений годового хода в исследуемый период не выявлено. Но в низких широтах есть примеры кардинального изменения годового хода повторяемости экстремальных осадков: так, для климата Am в конце XX века максимум повторяемости экстремальных осадков приходился на первое полугодие (январь–июль), а в XXI веке сместился на второе полугодие (август–январь). Причины таких изменений требуют дальнейших исследований и будут рассмотрены в последующих работах, посвященных анализу связи частоты возникновения экстремальных климатических условий и потоков парниковых газов в различных типах растительных сообществ.

3.3. Изменение степени экстремальности режима температуры воздуха и осадков в последние десятилетия

На заключительном этапе оценки глобального распределения экстремальных погодных условий была поставлена цель определить, в каких регионах отмечен максимальный рост частоты возникновения экстремальных событий (как положительных, так и отрицательных) в последние десятилетия. Пространственная структура регионов частого возникновения экстремально низких и экстремально высоких температур демонстрирует значимую отрицательную корреляционную связь (−0.55 в среднем за год): там, где реже возникают положительные экстремумы, чаще фиксируются отрицательные, и наоборот (табл. 3). Для осадков аналогичная связь проявляется намного слабее, коэффициент корреляции незначим (−0.27).

Наибольший интерес для дальнейшего исследования представляют регионы, где отмечается общий рост числа экстремальных событий – как положительных, так и отрицательных. На рис. 4 приведена разность числа месяцев с экстремальными температурами воздуха и суммами осадков (как высокими, так и низкими) в начале XXI века по сравнению с концом XX века.

Хорошо заметно, что области, где отмечается рост числа экстремальных температур и экстремальных осадков, между собой согласованы слабо. Тем не менее, можно выделить регионы, где частота экстремальных событий в целом выше.

В период с мая по октябрь четко выделяется “пояс” роста частоты возникновения экстремальных температурных условий вблизи климатической границы умеренной и тропической воздушных масс на обширной территории Евразии от Черного и Каспийского морей до побережья Тихого океана (рис. 4б). Аналогичная вытянутая в зональном направлении область прослеживается на границе умеренной и арктической воздушных масс на севере Сибири. Это можно интерпретировать как проявление роста неустойчивости погодных режимов и, как следствие, большей изменчивости положения атмосферных фронтов на фоне глобального роста температуры в последние десятилетия. В Северной Америке отмечается субмеридиональное распределение частоты возникновения экстремальных температурных условий: на востоке континента их становится больше, на западе – меньше. Такое распределение может быть обусловлено меньшими размерами континента по сравнению с Евразией и уменьшением влияния Атлантики (рост экстремальности тут формируется преимущественно за счет увеличения повторяемости очень высоких температур), однако конкретные механизмы формирования выявленных аномалий требуют дальнейших исследований. Интересно также отметить существенный рост частоты возникновения экстремальных температур в экваториальных районах Африки во все сезоны года (рис. 4а, 4б), причем преимущественно за счет роста числа очень теплых событий (см. рис. 2а) и в период с мая по октябрь в центре Австралийского континента и в Патагонии (рис. 4б). В холодное полугодие Северного полушария в XXI веке отмечается рост экстремальности температурного режима на территории Гренландии, Восточной Европы, Северо-Востоке Сибири, юго-востоке Северной Америки и на востоке Южной Америки (рис. 4а).

Пространственная структура изменения числа месяцев с экстремальными осадками отличается существенно большей мозаичностью по сравнению с температурой. Наиболее заметно в период с ноября по апрель возросла частота экстремальных событий на севере Аляски (рис. 4в), а с мая по

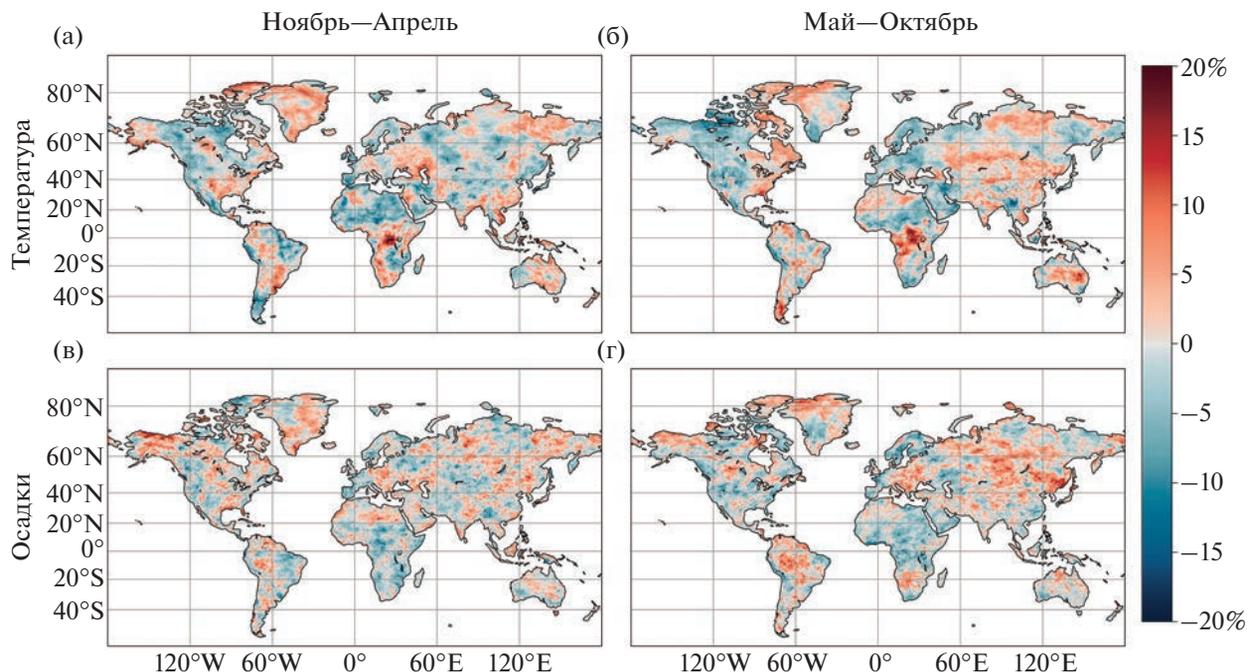


Рис. 4. Изменение числа месяцев (в процентах от общего числа месяцев в соответствующем полугодии и периоде) с экстремальными температурами воздуха (а, б) и осадками (в, г), превышающими 95% квантиль или не достигающими 5% квантиль функции распределения вероятности между началом XXI века (2001–2021 гг.) и концом XX века (1980–2000 гг.) для холодного (а, в) и теплого (б, г) полугодия.

октябрь – в Бразилии, в Центральной Азии и на Дальнем Востоке (рис. 4г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе глобального реанализа ERA5 по среднемесячным данным проведено исследование частоты возникновения экстремальных значений температуры воздуха и осадков и оценена степень изменения условий экстремальности в начале XXI века по сравнению с концом XX-го. В качестве критерия экстремальности было выбрано превышение 95% квантиля функции распределения вероятности для экстремально высоких температур и интенсивных осадков и не достижение 5% квантиля для низких температур и слабых осадков.

Показано, что частота возникновения экстремальных температур воздуха тесно связана с глобальным трендом потепления последних десятилетий, однако локализация областей наиболее частого возникновения экстремальных событий в конце XX и начале XXI века в ряде регионов изменяется довольно сильно. Для осадков частота возникновения экстремальных событий за исследуемый период изменилась незначительно.

Выявлены различия частоты возникновения экстремальных температур воздуха и осадков в годовом ходе для различных природных зон. Во внетропических широтах преобладает летний

максимум повторяемости экстремальных температур и равномерный годовой ход для экстремальных осадков. В засушливых и внутритропических регионах годовой ход чаще всего имеет сложный вид с несколькими максимумами и минимумами, сроки наступления которых обусловлены локальными особенностями и требуют отдельного рассмотрения для каждого региона.

Анализ изменения частоты возникновения экстремальных температур воздуха и осадков в XXI веке по сравнению с XX позволил выделить регионы, где глобальные климатические изменения последних десятилетий привели к заметному росту экстремальности погодных условий. Показано, что области изменения степени экстремальности температуры и осадков мало согласованы друг с другом. Для температуры воздуха наиболее заметен рост частоты экстремальных событий вблизи климатических границ арктической и умеренной, а также умеренной и тропической воздушных масс над Евразией в теплое полугодие, что отражает рост степени неустойчивости погодных режимов в этих областях. Для осадков наибольший рост экстремальности в XXI веке отмечается также в теплое полугодие Северного полушария на территории Центральной Азии и Дальнего Востока.

Проведенный анализ позволил выявить регионы, где экстремальные климатические условия возникают наиболее часто, оценить, как эта ча-

стота изменялась в последние десятилетия, а также определить особенности годового хода частоты возникновения экстремальных событий в зависимости от типа климата и природной зоны. Полученные результаты будут использованы в дальнейших исследованиях, посвященных оценке влияния экстремальных климатических условий на потоки парниковых газов в различных типах экосистем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-17-00073.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Beck H.E. et al.* Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution // *Sci. Data*. 2018. V. 5. P. 1–12.
- Beer C. et al.* Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate // *Science* (80-). 2010. V. 329. № 5993. P. 834–838.
- Frank D.C. et al.* Water-use efficiency and transpiration across European forests during the Anthropocene // *Nat. Clim. Chang.* 2015. V. 5. № 6. P. 579–583.
- Frank J., Massey J.* The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit // *J. Am. Stat. Assoc.* 1951. V. 46. № 253. P. 68–78.
- Hansen J., Sato M., Ruedy R.* Perception of climate change // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2012. V. 109. № 37.
- Hersbach H. et al.* The ERA5 global reanalysis // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020. V. 146. № 730. P. 1999–2049.
- Lavers D.A. et al.* An evaluation of ERA5 precipitation for climate monitoring // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2022. V. 148. № 748. P. 3152–3165.
- Lei X. et al.* How Well Does the ERA5 Reanalysis Capture the Extreme Climate Events Over China? Part I: Extreme Precipitation // *Front. Environ. Sci.* 2022. V. 10. № June. P. 1–14.
- Li L. et al.* Responses of greenhouse gas fluxes to climate extremes in a semiarid grassland // *Atmos. Environ.* 2016. V. 142. P. 32–42.
- Mahecha M.D. et al.* Global convergence in the temperature sensitivity of respiration at ecosystem level // *Science* (80-). 2010. V. 329. № 5993. P. 838–840.
- O’Gorman P.A.* Precipitation Extremes Under Climate Change // *Curr. Clim. Chang. Reports*. 2015. V. 1. № 2. P. 49–59.
- Parmesan C. et al.* Chapter 2: Terrestrial and Freshwater Ecosystems and their Services. 2022. P. 197–378.
- Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A.* Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification // *Hydrol. Earth Syst. Sci. Updat.* 2007. V. 11. P. 1633–1644.
- Reichstein M. et al.* Climate extremes and the carbon cycle // *Nature*. 2013. V. 500. № 7462. P. 287–295.
- Seneviratne S.I. et al.* Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate // *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / под ред. V. Masson-Delmotte et al. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. P. 1513–1766.
- Shapiro S.S., Wilk M.B.* An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples) // *Biometrika*. 1965. V. 52. № 3/4. P. 591–611.
- Smith M.D.* The ecological role of climate extremes: Current understanding and future prospects // *J. Ecol.* 2011. V. 99. № 3. P. 651–655.
- Tabari H.* Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. № 1. P. 1–10.
- Weibull W.* A Statistical Distribution Function of Wide Applicability // *J. Appl. Mech.* 1951. V. 103. P. 293–297.
- Xu W. et al.* How Well Does the ERA5 Reanalysis Capture the Extreme Climate Events Over China? Part II: Extreme Temperature // *Front. Environ. Sci.* 2022. V. 10. № June. P. 1–15.
- Zhao M., Running S.W.* Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009 // *Science* (80-). 2010. V. 329. № 5994. P. 940–943.
- Zscheischler J. et al.* Detection and attribution of large spatiotemporal extreme events in Earth observation data // *Ecol. Inform.* 2013. V. 15. P. 66–73.
- Zscheischler J. et al.* A few extreme events dominate global interannual variability in gross primary production // *Environ. Res. Lett.* 2014a. V. 9. № 3.
- Zscheischler J. et al.* Impact of large-scale climate extremes on biospheric carbon fluxes: An intercomparison based on MsTMIP data // *Global Biogeochem. Cycles*. 2014b. V. 28. № 6. P. 585–600.
- Zscheischler J. et al.* Extreme events in gross primary production: A characterization across continents // *Biogeosciences*. 2014c. V. 11. № 11. P. 2909–2924.

Variability of Extreme Air Temperatures and Precipitation in Different Natural Zones in Late XX and Early XXI Centuries According to ERA5 Reanalysis Data

I. V. Zheleznova¹, * and D. Y. Gushchina¹, **

¹Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: ijeleznova@gmail.com

**e-mail: dasha155@mail.ru

Global temperature rise on the planet is accompanied by an increase in the frequency of extreme weather events, which can lead to significant disturbances in plant metabolic processes and the functioning of plant

communities. Depending on the type of vegetation and climatic conditions, the extent and nature of this impact can vary significantly. Therefore, the aim of this work was to identify areas with different types of plant communities that have been most affected by extreme temperatures and precipitation in recent decades. To identify regions with temperature and precipitation extremes, we estimated the frequency of exceeding a given threshold (less than 5% quantile or greater than 95% quantile) for selected theoretical probability density functions for the air temperature and precipitation series. The number of cases of exceeding the extreme threshold is calculated for the whole globe, their spatial and temporal variability in different seasons of the year and in the first decades of the XXI century compared to the end of the XX century is analysed. The regions with different types of plant communities with the most pronounced amplification of extreme temperature and precipitation regimes under changing climate conditions were identified.

Keywords: extreme weather events, plant communities, air temperature, precipitation, climate change