

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИГ РАН)

На правах рукописи



АЛЕШИНА Мария Александровна

**ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОСАДКОВ
В РЕГИОНАХ РОССИИ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА**

1.6.18 — Науки об атмосфере и климате

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
академик РАН, д.ф.-м.н.,
Семенов Владимир Анатольевич

Москва
2023

Оглавление	
Введение	3
Глава 1. Современное состояние исследований экстремальных осадков в условиях глобального потепления	10
1.1. Особенности наблюдаемых изменений климата.....	10
1.2. Физические механизмы и факторы, влияющие на режим экстремальных осадков	23
1.3. Обзор источников метеорологических данных.....	30
Глава 2. Связь экстремальных осадков разных типов с приземной температурой в России по стационарным данным и реанализам	39
2.1. Используемые данные и методы	39
2.2. Проверка соответствия изменений экстремальных осадков соотношению Клаузиуса-Клапейрона	42
2.3. Фактор относительной влажности в формировании связи интенсивности экстремальных осадков с температурой.....	51
Глава 3. Изменение характеристик температуры и осадков в XX-XXI вв. по данным наблюдений и моделей климата СМIP6	59
3.1. Данные и методы.....	60
3.2. Изменения характеристик температуры на территории России в XX – XXI вв. по данным наблюдений и ансамбля моделей СМIP6	63
3.3. Изменения характеристик осадков на территории России в XX - XXI вв. по данным ансамбля моделей СМIP6	73
Глава 4. Региональные особенности современных изменений характеристик осадков в Черноморском регионе	86
4.1. Сравнение реанализов и эмпирических сеточных архивов данных по температуре и осадкам с данными стационарных наблюдений.....	87
4.2. Наблюдаемые изменения температурно-влажностного режима Черноморского побережья Кавказа	95
4.3. Анализ физических процессов, определяющих изменения температурно - влажностного режима Черноморско-Кавказского региона.....	105
4.4. Роль глобальных и региональных факторов в изменении экстремальности летних осадков на Черноморском побережье Кавказа	110
Заключение	121
Список литературы	123
Приложения	141

Введение

Актуальность работы

Климат Земли по данным метеорологических наблюдений быстро меняется на протяжении последнего столетия. С начала XX века глобальная приповерхностная температура воздуха выросла на 1.2 °С. При этом над сушей изменения происходят примерно в 2 раза быстрее чем над океанами [Masson-Delmotte et al., 2021]. Наблюдаемые за последние 100 лет темпы роста температуры в несколько раз превышают скорость изменений климата за аналогичные промежутки времени в последнее тысячелетие. Важно отметить, что основной прирост температуры пришелся на последние десятилетия, только за период 1976-2020 гг. глобальная приземная температура воздуха выросла на 0.8 °С. Согласно данным наблюдений, рост температуры на территории Российской Федерации (РФ) происходит в 2.5 раза более быстрыми темпами, чем в среднем по планете, а в арктических регионах – быстрее чем в 3 раза [Бардин др., 2020; Третий оценочный доклад, 2022; Векряев et al., 2010].

Из-за роста испарения и влагоемкости атмосферы при потеплении в целом ожидается интенсификация гидрологического цикла, рост частоты и интенсивности осадков, в том числе экстремальных [Allan and Soden, 2008; Semenov and Bengtsson, 2002; Min et al., 2011; Colman and Soden, 2021; Vargas Godoy et al., 2021]. Огромная протяженность территории России и особенности изменений атмосферной циркуляции обуславливает существенные различия тенденций изменений осадков в разных регионах, в частности, наблюдаемые разнонаправленные изменения осадков в теплый период года, когда в северных регионах отмечается тенденция к росту, а в южных – к уменьшению осадков [Третий оценочный доклад, 2022; Sun et al., 2012; Ren et al., 2013; Gu and Adler, 2015].

В ряде работ показано, что относительный рост интенсивности осадков может происходить гораздо быстрее, чем ожидается при увеличении влагоемкости атмосферы, что связано с интенсификацией конвективных процессов [Lenderink and Meijgaard, 2008; Berg and Haerter, 2009]. С другой стороны, в последние годы на основе анализа эмпирических данных выдвинута гипотеза об уменьшении осадков при превышении приземной температуры определенного порога [Hardwick Jones et al., 2010; Westra et al., 2014; Wang et al., 2018].

На фоне изменений климата важной проблемой является изучение изменения частоты и интенсивности экстремальных осадков, ведь именно сильные осадки могут стать причиной серьезных природных бедствий [Meredith et al., 2015; Frolova et al., 2017]. Понимание механизмов возникновения сильных осадков необходимо для составления более точных климатических и метеорологических прогнозов, которые помогут уменьшить потенциальные риски от таких явлений [Sillmann et al., 2017; Masson - Delmotte et al., 2021].

Для территории России отмечается положительный тренд среднего количества осадков [Третий оценочный доклад, 2022]. Более того, среднее количество осадков в последние 30 лет увеличивалось значительно сильнее, чем за весь период наблюдений 1936-2010 гг. [Бардин и др., 2020]. На большей части территории России отмечено увеличение дней с экстремальными осадками зимой и весной [Титкова и др., 2018; Zolotokrylin and Cherenkova, 2017], при этом для летнего сезона наблюдается увеличение экстремальных осадков на Дальнем Востоке и на Европейской территории России [Черенкова, 2015]. Несмотря на рост интенсивности осадков, одновременно с этим может наблюдаться увеличение длительности периодов без осадков [Золина, Булыгина, 2016]. Это означает, что в некоторых регионах даже в условиях роста общего количества осадков может увеличиваться число дней без осадков и засух, сменяющихся экстремальными осадками. Важной характеристикой в таком случае является тип выпадающих осадков. Например, в [Chernokulsky et al., 2019] отмечается, что небольшое увеличение осадков в Северной Евразии обеспечивается за счет сильного роста конвективных осадков и соответствующего уменьшения крупномасштабных осадков. Такое перераспределение также может привести к негативным последствиям на экосистемы и население.

Проблема регионального отклика режима осадков на глобальные изменения климата является одной из ключевых в современной гидрометеорологии [Sillmann et al., 2017; Trenberth, 2011]. Однако вопросы, связанные с физическими механизмами региональных изменений климата, выявляемых по данным наблюдений и реанализов, зачастую остаются открытыми [Hawkins and Sutton, 2009; Pfahl et al., 2017; Pierce et al., 2009].

Большой научный и практический интерес представляют механизмы формирования экстремальных осадков в прибрежных густонаселенных регионах. Для России это, прежде всего, Черноморское побережье Кавказа. В работе [Volosciuk et al., 2016]

проведен анализ численных экспериментов с моделью ECHAM5, который позволил выявить связь увеличения температуры Средиземного моря с экстремальными осадками в центральной Европе, участившимися в начале 21 века. Было показано, что повышение температуры поверхности Средиземного моря приводит к увеличению влагосодержания средиземноморских циклонов за счет роста испарения с поверхности моря. После сильного наводнения в Крымске в 2012 году были проведены численные эксперименты на чувствительность экстремальных осадков в черноморском регионе [Meredith et al., 2015b]. Получены результаты о принципиально важной роли увеличения температуры Черного моря в формировании этого экстремального события.

На территории России ежегодно фиксируется большое количество опасных погодных и климатических явлений. Наибольшую актуальность в данном направлении исследований имеет вопрос о возможном влиянии процесса глобального потепления на изменение частоты или силы экстремальных погодных и климатических явлений. Поэтому важным вопросом является не только изучение глобальных тенденций климатических характеристик, но и анализ региональных особенностей динамики климата, в особенности его экстремальных показателей.

Выявление значимых тенденций характеристик осадков, в том числе экстремальных, на территории РФ в последние десятилетия и оценка возможных будущих изменений в XXI веке является актуальной задачей, важной для учета изменений климата при разработке планов устойчивого развития регионов РФ. Уточнение факторов, оказывающих влияние на формирование экстремальных осадков в разных регионах России, в том числе фактора глобального потепления, играет важную роль в научном и общественном понимании последствий изменения климата и важно для улучшения прогноза таких явлений. Результаты данной работы могут помочь при разработке эффективных мер по уменьшению уязвимости населения и экономики страны к возможным рискам, связанным с экстремальными осадками.

Целью диссертационной работы является выявление современных и оценка возможных будущих изменений характеристик экстремальных осадков на территории России и уточнение факторов формирования экстремальных осадков на основе анализа эмпирических данных и данных моделей климата.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

Исследовать особенности зависимости интенсивности экстремальных осадков от температуры в различные сезоны на территории России в последние десятилетия с использованием данных метеорологических станций и реанализов.

Получить количественные оценки изменений характеристик суточных осадков, в т.ч. экстремальных, на территории России в XXI веке по данным сценарных прогнозов ансамблей климатических моделей проекта CMIP6.

Выполнить количественные оценки изменений характеристик экстремальных осадков на Черноморском побережье России за последние десятилетия по данным метеорологических станций и реанализов.

Исследовать роль глобальных и региональных факторов в изменении экстремальности летних осадков на черноморском побережье Кавказа в последние десятилетия с использованием результатов численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы.

Объект исследования – экстремальные осадки на территории России.

Предмет исследования – характеристики атмосферных осадков, в том числе экстремальных, на территории России и факторы, влияющие на их изменения.

Положения, выносимые на защиту

1. Выявлены различные типы зависимости интенсивности экстремальных осадков от приземной температуры воздуха на территории России в период последних 4 - х десятилетий. Для зимнего сезона преобладающей зависимостью является экспоненциальный рост интенсивности с увеличением температуры. Летом в большинстве регионов усиление экстремальных осадков происходит при температурах до 15°-20° С, дальнейшее повышение температуры сопровождается стабилизацией или уменьшением интенсивности экстремальных осадков.

2. По данным ансамблей климатических моделей CMIP6 при разных сценариях антропогенного воздействия на климат в XXI веке выявлены тенденции изменений характеристик экстремальных осадков на территории России. Во второй половине XXI века зимой отмечается увеличение сумм осадков и повторяемости экстремальных осадков практически на всей территории России. К концу XXI века летом в целом количество осадков уменьшается в западных и южных регионах РФ.

3. В период 1979-2018 гг., несмотря на рост приземной температуры, интегрального влагосодержания и доступной потенциальной конвективной энергии, в летний сезон на Черноморском побережье Кавказа в целом не выявлено статистически значимого роста среднего количества осадков, их суточной интенсивности и экстремальных значений, что может быть связано с усилением дивергенции влаги в регионе.

4. С использованием данных численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы показано, что региональный рост температуры поверхности Черного моря может приводить к увеличению экстремальности осадков на Черноморском побережье России в летний период. В то же время глобальные изменения температуры поверхности океана способствуют уменьшению осадков, в том числе экстремальных, что в модели связано с интенсификацией региональных процессов подавления конвекции.

Научная новизна

Впервые был выполнен анализ зависимостей интенсивности экстремальных осадков и приземной температуры воздуха для территории России по данным метеорологических станций и реанализа для разных типов осадков.

Оценены ожидаемые изменения характеристик приземной температуры воздуха и осадков по данным наблюдений и ансамблю современных глобальных моделей климата CMIP6 для XX-XXI вв.

Впервые предложены механизмы, ответственные за стабилизацию режима осадков летом на Черноморском побережье Кавказа.

Впервые с помощью численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы исследована роль региональных изменений температуры поверхности Черного моря и глобальных изменений температуры поверхности океана в изменениях характеристик осадков в черноморском регионе.

Теоретическая и практическая значимость работы

В диссертационной работе предложен новый механизм, объясняющий тенденции изменения осадков в т.ч. экстремальных, на Черноморском побережье Кавказа с учетом глобальных и региональных факторов климатических изменений.

Получены оценки ожидаемых изменений характеристик экстремальных осадков в различных регионах России в XXI веке по ансамблю современных глобальных моделей климата CMIP6 с использованием разных сценариев антропогенного воздействия.

Таким образом, в диссертационной работе получены новые результаты и уточнены уже имеющиеся знания об особенностях характеристик экстремальных осадков на территории России, которые могут быть использованы для совершенствования долгосрочных климатических прогнозов, а также в выработке эффективных мер по уменьшению риска негативных последствий опасных погодно-климатических явлений на территории России.

Личный вклад автора

Все научные результаты представляемой диссертационной работы получены автором лично или в соавторстве с д.ф.-м.н. В.А. Семеновым. Личный вклад автора состоял в формулировке цели, постановке задач, обсуждении и интерпретации полученных результатов, формулировке выводов, подготовке публикаций в рецензируемых научных изданиях. Автором самостоятельно проводились обработка и анализ данных метеорологических станций, реанализов и климатических моделей с использованием статистических методов. Автору принадлежит ведущая роль в написании научных статей и в представлении научных докладов по основным результатам диссертации.

Исследование зависимости экстремальных осадков от температуры, а также анализ численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы проводились совместно с к.ф.-м.н. А.В. Чернокульским, анализ изменений характеристик осадков в черноморском регионе выполнен совместно с к.г.н. П.А. Тороповым.

Достоверность полученных результатов определяется использованием данных инструментальных наблюдений на метеостанциях, а также современных реанализов и климатических моделей. Все количественные результаты получены с применением обоснованных статистических методов и сопровождаются оценками точности. Достоверность результатов работы подтверждается физической непротиворечивостью выводов и их согласованностью с современными представлениями о причинах и последствиях наблюдаемых изменений климата, объективным сопоставлением результатов анализа данных наблюдений, реанализов, численных экспериментов с

моделями атмосферы и климата. Текст диссертации полностью написан автором за исключением случаев, где указаны цитируемые источники.

Апробация работы

Результаты диссертационного исследования были представлены на отечественных и зарубежных конференциях и семинарах:

22-я Международная школа-конференция молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (Майкоп, 2018 г.); Тематическая конференция международного географического союза, посвященная 100-летию Института географии РАН «Практическая география и вызовы XXI века» (Москва, 2018 г.); Всероссийская конференция «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования» (Москва, 2019 г.); XIII Сибирское совещание и школа молодых ученых по климату - экологическому мониторингу (Томск, 2019 г.); Международные научно-технические конференции «Системы контроля окружающей среды» (Севастополь, 2017, 2019, 2020 г.); Международные Симпозиумы «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (2018, 2019, 2020 г.); Ассамблеи Европейского геофизического союза (EGU, Вена, 2018, 2021 г.); VI Всероссийская научно-практическая конференция "Современные аспекты санаторно-курортного лечения, медицинской реабилитации и спортивной медицины" (Ессентуки, 2022 г.).

По результатам диссертационной работы опубликовано 9 работ в рецензируемых научных изданиях, в т.ч. 6 в журналах, рекомендованных ВАК и входящих в базы данных SCOPUS, Web of Science или Russian Science Citation Index (RSCI), и 3 – в рецензируемых тезисах докладов, индексируемых в Web of Science.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 204 наименований работ отечественных и зарубежных авторов, 16 приложений, и содержит 156 страниц, включая 53 иллюстрации и 5 таблиц в основном тексте, а также 13 иллюстраций и 3 таблиц в приложениях.

Глава 1. Современное состояние исследований экстремальных осадков в условиях глобального потепления

1.1. Особенности наблюдаемых изменений климата

Климат Земли по данным метеорологических наблюдений быстро меняется на протяжении последнего столетия. Оценкам тенденций глобального климата посвящено значительное количество работ в гидрометеорологии. Исследования в этой области анализируются межправительственной группой экспертов по изменениям климата (МГЭИК, IPCC) [Masson-Delmotte et al., 2021]. В данной работе приведены лишь некоторые оценки, необходимые для сопоставления глобальных тенденций изменений температуры и осадков с таковыми, выявленными на территории России.

По данным инструментальных наблюдений глобальная приземная температура воздуха в 2011-2020 гг. была на 1.09°C (0.95°C — 1.2°C) выше, чем в 1850-1900 гг. (Рис. 1.1). Над сушей данные изменения выражены сильнее и разность температур для этих периодов составляет 1.59°C (1.34°C — 1.83°C). Скорость роста глобальной приземной температуры начиная с 1970-х гг. характеризуется наибольшими значениями по сравнению с любым из предыдущих 50-ти летних периодов за последние 2000 лет [Masson-Delmotte et al., 2021].

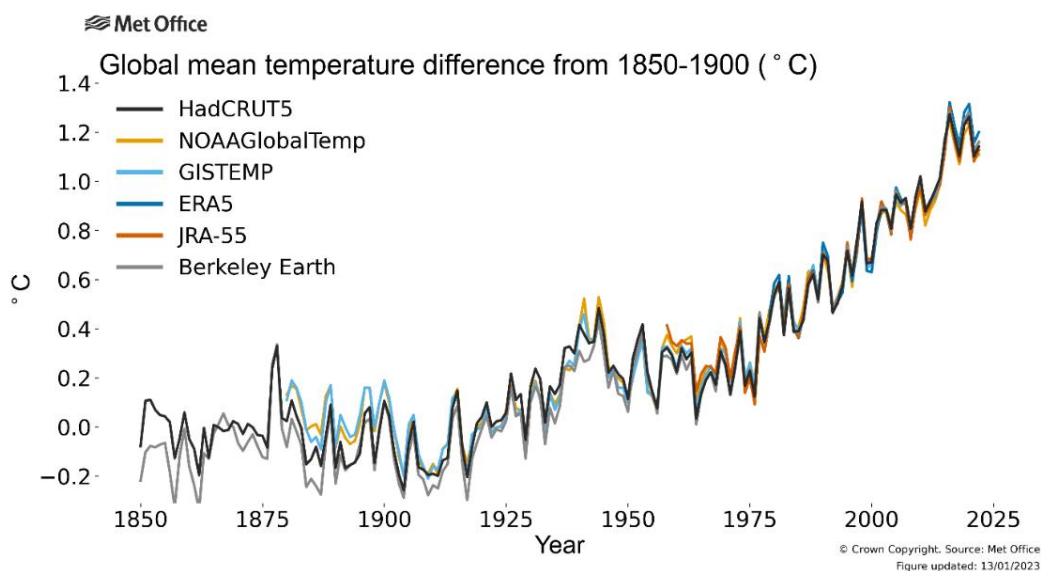


Рисунок 1.1. Значения глобально осредненной аномалии приповерхностной температуры земного шара (в $^{\circ}\text{C}$) за период инструментальных наблюдений, рассчитанный на основе различных архивов данных [<https://climate.metoffice.cloud/temperature.html>].

Изменения температурного режима носят неоднородный характер и характеризуются значительными декадными особенностями. В частности, наибольшие темпы потепления в XX веке наблюдались в периоды с 1910 по 1945 гг. и с 1976 по 2000 гг. с максимальными значениями в высоких широтах Северного полушария [Bekryaev et al., 2010; Бокучава, Семенов, 2022], в середине столетия темпы потепления были ниже или даже отмечалось некоторое похолодание. Изменения температурного режима характеризуются значительными региональными и сезонными особенностями. Например, для Северной Европы характерно более сильное потепление в зимние месяцы, а для Средиземноморья – в летние [Zveryaev and Gulev, 2009; Twardosz et al., 2021]. Региональные и сезонные особенности изменений температурных характеристик связаны в первую очередь с глобальными и региональными изменениями термодинамических факторов, но также могут зависеть от частоты, устойчивости и продолжительности региональных особенностей циркуляции атмосферы [Shepherd, 2015]. Например, в работе [Horton et al., 2015] отмечается, что увеличение повторяемости экстремально высоких температур в регионах Европы и Северной Америки в 1979-2013 гг. в значительной мере согласуется с увеличением частоты антициклонов летом и осенью, а возникновение условий с экстремально низкими температурами зимой в Центральной Азии с 1990-х гг. может быть связано с повышением частоты вторжений с севера арктических воздушных масс.

Средняя скорость роста среднегодовой температуры воздуха на территории России в 1976 - 2019 гг. составила $0.47^{\circ}\text{C}/10$ лет [Бардин др., 2020]. Это более чем в два с половиной раза больше скорости роста глобальной температуры за тот же период ($0.18^{\circ}\text{C}/10$ лет), и более чем в полтора раза больше средней скорости потепления приземного воздуха над сушей Земного шара ($0.28^{\circ}\text{C}/10$ лет, оценки по данным Центра Хэдли и Университета Восточной Англии).

Европейская территория России в среднем за год теплеет быстрее ($0.52^{\circ}/10$ лет), чем Азиатская часть страны ($0.46^{\circ}/10$ лет) [Бардин др., 2020]. Но наиболее быстрыми темпами в течение последних тридцати лет росла температура Северной полярной области (т.н. Арктическое усиление) [Семенов, 2021], по данным ФГБУ «ААНИИ» в 1990-2019 гг. рост среднегодовой температуры составил для этого региона $0.88^{\circ}\text{C}/10$ лет, т.е. 2.64°C за 30 лет [Третий оценочный доклад..., 2022]. При этом современные быстрые климатические изменения в Арктике могут приводить к изменению частоты

погодно - климатических аномалий в других широтных зонах [Мохов, 2020; Семенов, 2021]. Например, формирование в последние годы аномально холодных зимних режимов в разных регионах Северного полушария часто происходят на фоне положительных аномалий температуры воздуха над Баренцевым морем зимой [Petoukhov and Semenov, 2010; Семенов и др., 2012; Мелешко и др., 2019; Мохов и Тимажев, 2019].

При анализе сезонных особенностей климата отмечается, что наибольшие темпы повышения температуры на территории России характерны для весеннего сезона ($0.63^{\circ}/10$ лет), особенно в Западной Сибири и на Чукотке (до $1.5^{\circ}/10$ лет) (Рис. 1.2).

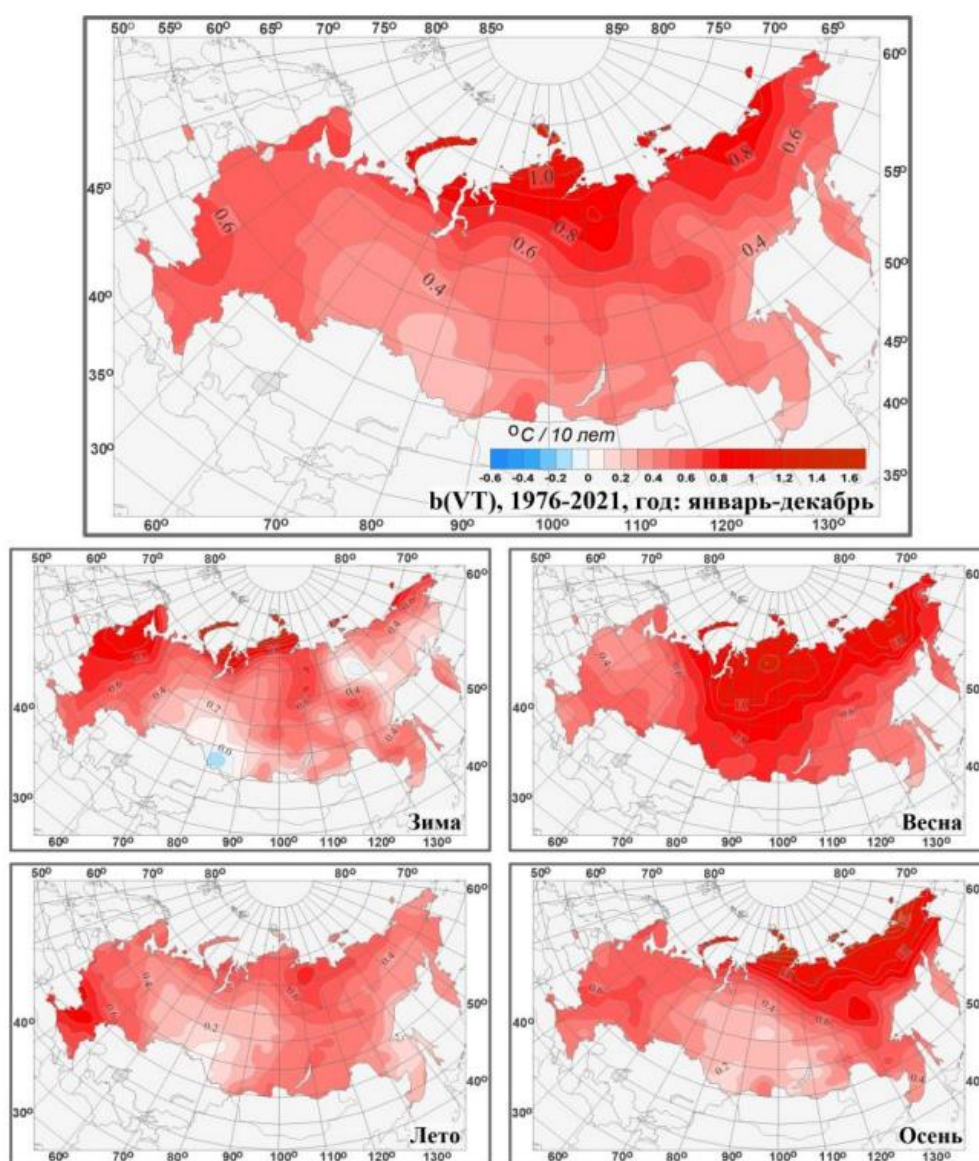


Рисунок 1.2. Коэффициент линейного тренда среднегодовой и средних сезонных значений температуры приземного воздуха (в $^{\circ}\text{C}/10$ лет) на территории России за период 1976 - 2021 гг. ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) [Третий оценочный доклад..., 2022].

Зимой для обширных регионов России тренды температуры по данным наблюдений на метеостанциях за последние 40 лет являются статистически не значимыми, что связано как с сильной естественной межгодовой изменчивостью, так и с неоднородностью долгопериодных изменений температуры в этот период – рост температуры отмечался в 1970-1990 гг., зимние температуры уменьшались с 1990-х гг. до 2010 г, а затем снова стали повышаться [Бардин др., 2020; Третий оценочный доклад..., 2022]. В южных регионах Сибири в начале XXI века отмечается область с отрицательными трендами средних температур зимой [Харюткина и др., 2019]. Летом повышение температуры происходит достаточно монотонно с 1970-х гг., в западной части страны тенденции немного выше ($0.47^{\circ}/10$ лет), чем в восточных регионах ($0.37^{\circ}/10$ лет), но наибольшие темпы повышения температуры летом отмечаются на юге Европейской территории России ($0.6-0.7^{\circ}/10$ лет) [Бардин др., 2020; Третий оценочный доклад ..., 2022]. Повышение температуры также может выражаться в изменении продолжительности теплых и холодных сезонов года или сезонов с устойчивым ледяным покровом и безледного периода в морях и реках [Ширяева и др., 2018], что крайне важно в том числе для сельского хозяйства, энергетики, судоходства. Например, для территорий западной части Российской Арктики отмечен значительный сдвиг дат осеннего и весеннего переходов через 0°C по данным наблюдений, а данные климатических моделей показывают, что продолжительность периода положительных температур на побережье Баренцева моря к концу столетия может составлять порядка 100 суток [Кислов и др., 2017].

Существенный рост температуры приводит к изменениям всех основных составляющих климатической системы, в том числе и характеристик гидрологического цикла в атмосфере. В докладе [Masson-Delmotte et al., 2021] подчеркивается, что человечество уже наблюдает последствия глобального потепления на 1°C , которые находят выражение в изменении режима осадков, более экстремальных погодных условиях, подъёме уровня моря, таянии морских льдов и ледников и многих других важных характеристик. Таким образом, вместе с повышением температуры с середины XX столетия происходит изменение различных составляющих гидрологического цикла [Yang et al., 2021], что выражается в увеличении влагосодержания атмосферы [Colman and Soden, 2021; Vargas Godoy et al., 2021], уменьшении площади морских льдов и горных ледников [Zemp et al., 2009], а также в изменении характеристик осадков

(в т.ч. экстремальных) [Allan and Soden, 2008], испарения [McVicar et al., 2012], эвапотранспирации [Zhang et al., 2016] и др.

Режим осадков характеризуется большей пространственной неоднородностью и чувствительностью к местным условиям (орографии, гидрологическим объектам и др.), чем температура. В последнем отчете МГЭИК утверждается [Gulev et al., 2021], что в среднем над континентами количество осадков увеличивается с середины XX века, ранее 1950-х годов тенденции осадков слабо выражены. Начиная с 1980-х гг. увеличение годовых сумм осадков становится более выраженным, однако межгодовая изменчивость осадков и региональные особенности вносят значительный вклад в характеристики режима осадков и их изменения (Рис. 1.3).

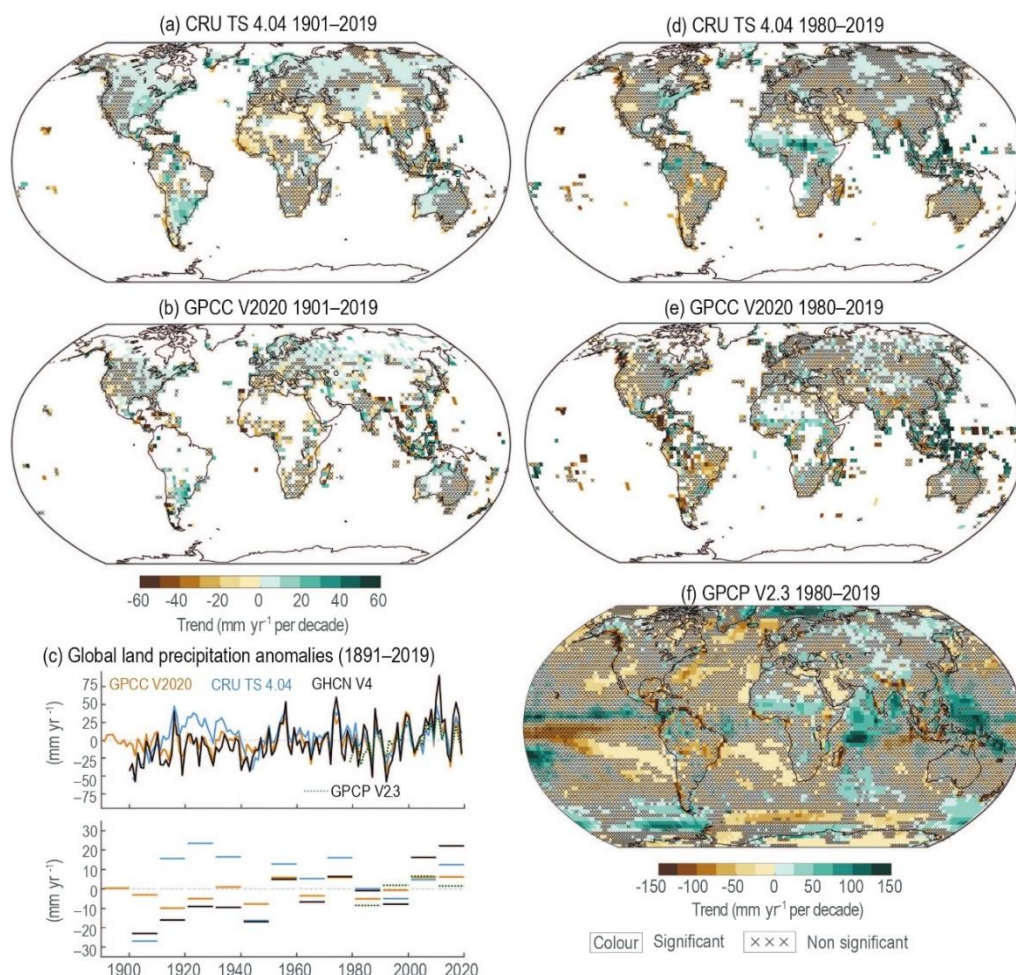


Рисунок 1.3. Коэффициенты линейного тренда среднегодового количества осадков (в мм/10 лет) по данным CRU TS 4.04 в 1901-2019 гг. (a), GPCC V2020 в 1901-2019 гг. (b), CRU TS 4.04 в 1980-2019 гг. (d), GPCC V2020 в 1980-2019 гг. (e), GPCP V2.3 в 1980 - 2019 гг. (f), а также ход аномалий годовых сумм осадков и декадных осредненных значений (в мм/год) относительно средних в 1981 – 2010 гг. [Gulev et al., 2021].

Стоит отметить, что данные по осадкам в разных архивах могут отличаться в зависимости от используемых источников информации и способов ее усвоения, горизонтального и временного разрешения [Simmons et al., 2010]. Например, в [Li et al., 2015] оценки глобальных трендов средней интенсивности осадков различались в трех архивах по знаку (СМАР, GPCP, реанализ NCEP) вследствие различий в тенденциях сильных и слабых осадков, а также в оценках изменений осадков над территориями океанов.

При изучении режима осадков используются различные характеристики среднего режима осадков и его экстремальных значений [Zhang et al., 2011], изучение и сопоставление которых может дать дополнительную информацию об особенностях наблюдаемых изменений. Например, интенсивность осадков над сушей может увеличиваться практически повсеместно даже в тех регионах, где отмечаются отрицательные или статистически не значимые тренды среднего количества осадков [Semenov and Bengtsson, 2002].

При глобальных оценках тренды часто имеют низкую степень статистической значимости, отдельные регионы характеризуются низкой плотностью метеорологических наблюдений, что побуждает использовать данные дистанционных измерений, имеющих свои особенности и ограничения [Gu and Adler, 2015; Rodell et al., 2015]. При анализе режима осадков важным является изучение региональных особенностей. Например, начиная с середины XX века над континентами наблюдается тенденция к увеличению общего количества осадков, которая усиливается с 1980-х гг. [Eyring et al., 2021]. Положительные тренды общего количества осадков были отмечены в основном для средних и высоких широт Северного полушария начиная с середины XX столетия, в то время как в тропиках и субтропиках преимущественно отмечалось уменьшение осадков [Sun et al., 2012; Ren et al., 2013; Gu and Adler, 2015], однако полученные оценки могут значительно варьироваться в зависимости от источника данных и исследуемого региона.

Проблема регионального отклика на глобальные изменения климата является одной из ключевых в современной гидрометеорологии за последние 20 – 25 лет. Однако вопросы, связанные с физическими механизмами региональных изменений климата, выявляемых по данным наблюдений и реанализов, зачастую остаются открытыми. Вместе с тем, особенности региональных изменений климата, определяющих

температурно-влажностный режим конкретных районов, имеют не меньший прикладной интерес, чем рассмотрение особенностей изменения климата в глобальном масштабе.

Для территории России период 1976-2019 гг. в среднем характеризовался увеличением суммарного годового количества осадков от 1 до 3.5% за 10 лет в разных регионах страны [Третий оценочный доклад, 2022]. Более того, среднее количество осадков в последние 30 лет увеличивалось значительно сильнее, чем за весь период наблюдений 1936 – 2010 гг. (Рис. 1.4).

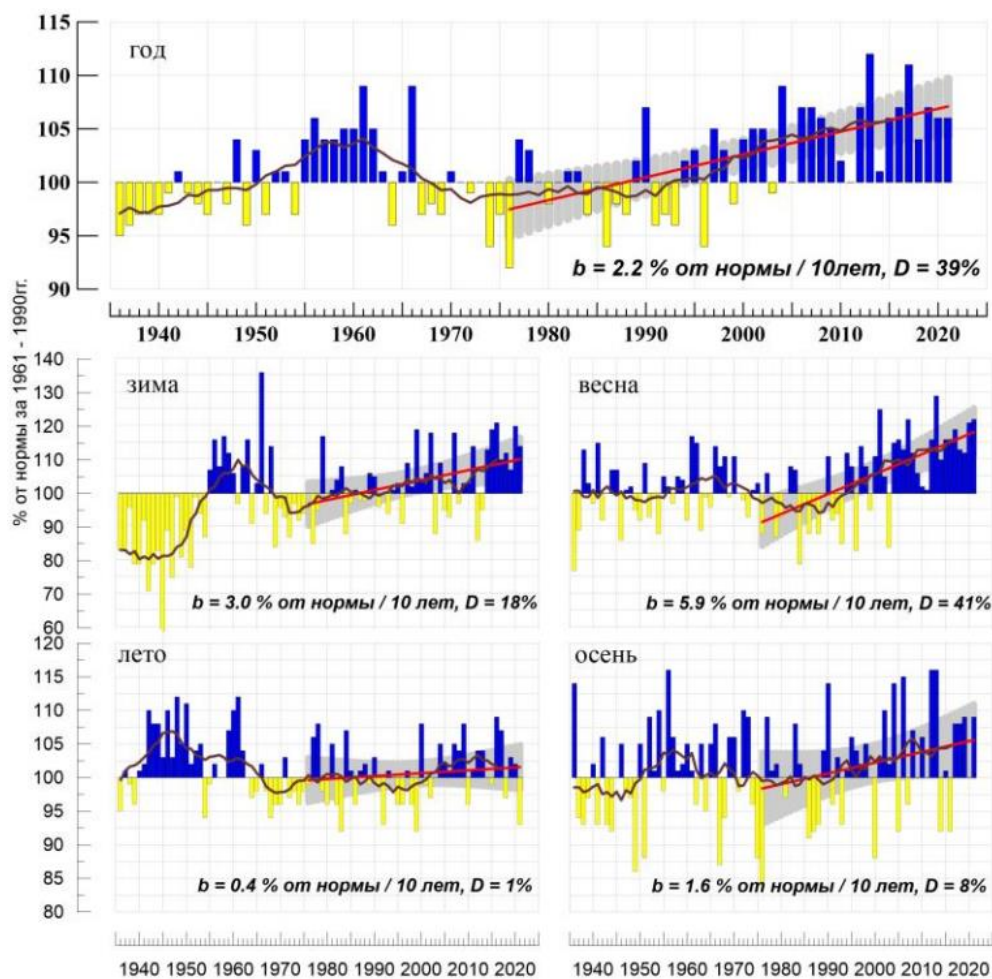


Рисунок 1.4. Средние годовые и сезонные аномалии осадков (в % от нормы/10 лет), осредненные по территории России в 1936-2021 гг. по данным ИГКЭ [Третий оценочный доклад..., 2022].

Сезонные изменения являются важной составляющей климатической изменчивости. Наибольшие темпы роста осадков характерны для весеннего сезона и составляют в среднем 5.7% за 10 лет (различия для разных физико-географических регионов составляют весной от 2.9% до 8.1% за 10 лет). Огромная протяженность территории России и особенности изменений атмосферной циркуляции обуславливают существенные

различия тенденций изменений осадков в разных регионах, в частности, наблюдаемые разнонаправленные изменения осадков в теплый период года, когда в северных регионах отмечается тенденция к росту, а в южных – к уменьшению осадков. Также важным фактором является тип выпадающих осадков. Например, в [Чернокульский и др., 2018; Chernokulsky et al., 2019] отмечается, что небольшое увеличение осадков в Северной Евразии обеспечивается за счет сильного роста конвективных осадков и соответствующего уменьшения крупномасштабных осадков. Аналогичные выводы были получены при анализе характеристик осадков, температуры и влажности воздуха для юга ЕТР [Ташилова, 2021; Шабанов и др., 2017]. Полученные тенденции по перераспределению типов осадков вероятно может сохраниться и в будущем [Катцов и др., 2022], что может привести к негативным последствиям на экосистемы и население.

Вопросом повышенного интереса является изучение возможных изменений вероятности возникновения или интенсивности экстремальных погодных и климатических явлений. Сильные осадки способны стать причиной серьезных природных бедствий, в первую очередь паводков и наводнений, с которыми могут связаны катастрофические социальные и экономические последствия [Данилов - Данильян и др., 2014; Meredith et al., 2015; Frolova et al., 2017]. В целом по стране отмечено увеличение быстроразвивающихся наводнений, связанных с выпадением сильных осадков и в период весеннего половодья [Георгиевский и др., 2014]

В качестве минимального периода для изучения климата (как глобального, так и регионального) в климатологии принято использовать временные ряды длиной порядка 30- 40 лет [Кислов, Суркова, 2014]. Но даже на столь большом временном масштабе изучение экстремальных осадков является достаточно сложной задачей. По определению, экстремальные явления представляют собой достаточно редкие события, для оценки риска возникновения которых часто прибегают к специальным статистическим методам [Zhang et al., 2011]. Характеристики экстремальности режима осадков обладают высокой степенью неоднородности. Также изучение экстремальных осадков сильно ограничено в регионах с низкой плотностью наблюдательной сети, а также зависит от временного шага фиксации осадков [Groisman et al., 2005; Martel et al., 2021]. При изучении экстремальных осадков важным вопросом является выбор типа функции распределения вероятностей для описания исследуемых явлений.

Например, для станций Европейского сектора Арктики проведен анализ с использованием распределения Парето, который позволил выделить случаи с экстремально высокими осадками в регионе и провести анализ синоптических ситуаций, связанных с такими явлениями [Кислов и др, 2021; Kislov et al., 2022].

На основе имеющихся данных по осадкам проводятся как глобальные оценки [Asadieh and Krakauer 2015; Donat et al. 2016; Sun et al., 2021], так и исследования по Северному полушарию, континентам [Groisman et al. 2005; Min et al., 2011; Van den Besselaar et al., 2013] или отдельным регионам мира [Мохов и др., 2005; Haerter and Berg, 2009; Long et al., 2021]. Начиная с середины XX века повторяемость сильных и экстремальных осадков увеличивается над континентами [Groisman et al. 2005; Donat et al. 2016]. Например, по данным метеорологических наблюдений усиление экстремальных осадков отмечено более чем на 65% станций за период 1950-2018 гг. (Рис. 1.5), наибольшая согласованность обнаруженных тенденций показана для территорий северной Европы, Восточной Азии, Северной Америки, неустойчивые тенденции, либо разреженная наблюдательная сеть отмечается для Африки, Южной Америки и Австралии [Sun et al., 2021].

Также над континентами отмечено увеличение максимальных суточных сумм осадков в среднем на 5.73 мм (8.5%) за 1901-2010 гг. [Asadieh and Krakauer, 2015]. В ряде работ отмечено существенное увеличение (5-6% в десятилетие) повторяемости экстремальных осадков в Европе [Groisman et al., 2005; Zolina et al., 2008; Klok and Klein Tank, 2009; Van den Besselaar et al., 2013; Donat et al., 2016; Myhre et al., 2019].

Увеличение экстремальных осадков может происходить в условиях статистически не значимых изменений средних сумм осадков, что было отмечено, например, для регионов России для современного [Мохов и др., 2005] и будущего климата [Khon et al., 2007], Европы [Christensen and Christensen, 2004; Du et al., 2022], Северной Америки и высоких широт Северного полушария [Groisman et al., 2005; Du et al., 2022], Китая [Long et al., 2021]. Данная особенность может быть связана с изменением повторяемости осадков разной интенсивности, когда одновременно с усилением интенсивности экстремальных осадков происходит увеличение продолжительности периодов без осадков [Золина, Булыгина, 2016]. Это означает, что в некоторых регионах даже в условиях стабильности общего количества осадков может увеличиваться

продолжительность засух и дней без осадков, сменяющихся случаями экстремальных осадков. Такое перераспределение также может быть связано с отмеченным ранее увеличением доли конвективных осадков в общей сумме, показанным, например, для территорий России (Рис. 1.6) [Чернокульский и др., 2018; Chernokulsky et al., 2019] и Европы [Haerter and Berg, 2009]. Также продолжительность дней без осадков увеличивается по данным метеорологических станций в теплый период года (май-сентябрь) в [Хлебникова и др., 2019] на Европейской территории России (за исключением регионов севернее 60°с.ш.), в Забайкалье и на Дальнем Востоке, причем данная тенденция может усилиться к концу XXI столетия.

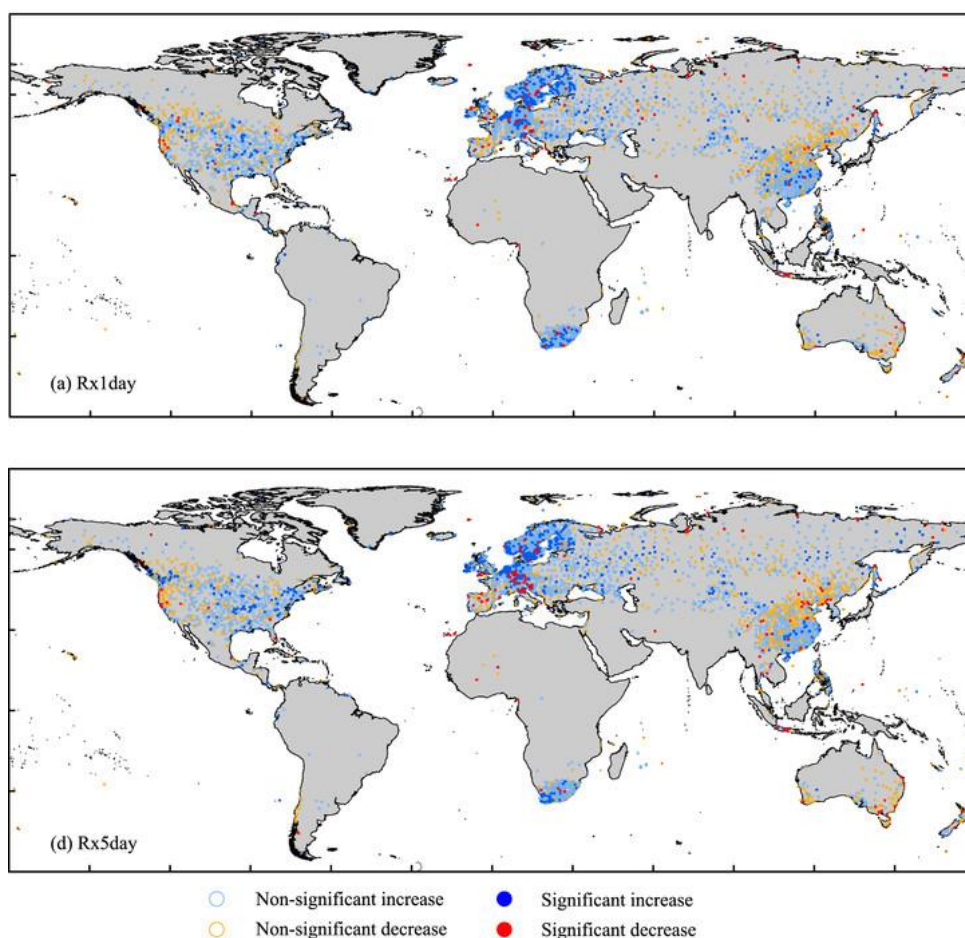


Рисунок 1.5. Тренды по данным метеорологических станций для суточных максимумов осадков (сверху) и максимумов осадков за 5 дней (снизу) в 1950-2018 гг. Синие/красные пустые кружки обозначают станции со статистически не значимыми отрицательными/положительными трендами, синие/красные закрашенные кружки обозначают станции со статистически значимыми отрицательными/положительными трендами (уровень 0.05) [Sun et al., 2021].

По данным метеорологических станций повторяемость экстремальных осадков зимой увеличилась в среднем на 20% в 2000–2015 гг. (относительно 1970–1999 гг.) на большей части ЕТР и на юге Сибири и уменьшилась в последние десятилетия на 40% в Алтайском крае, в центре Восточной Сибири и на Северо-Востоке России [Титкова и др., 2018]. В [Zolotokrylin, Cherenkova, 2017] также отмечено увеличение дней с экстремальными осадками зимой и весной на большей части территории России (Рис. 1.7). Для летнего сезона отмечено увеличение частоты сильных осадков на Дальнем Востоке и в бассейне реки Амур, а также уменьшение повторяемости экстремальных осадков на юге ЕТР, где ранее также отмечено увеличение повторяемости засух в летний период [Черенкова, 2015]. Схожие сезонные особенности получены для Иркутской области [Кочугова, 2017].

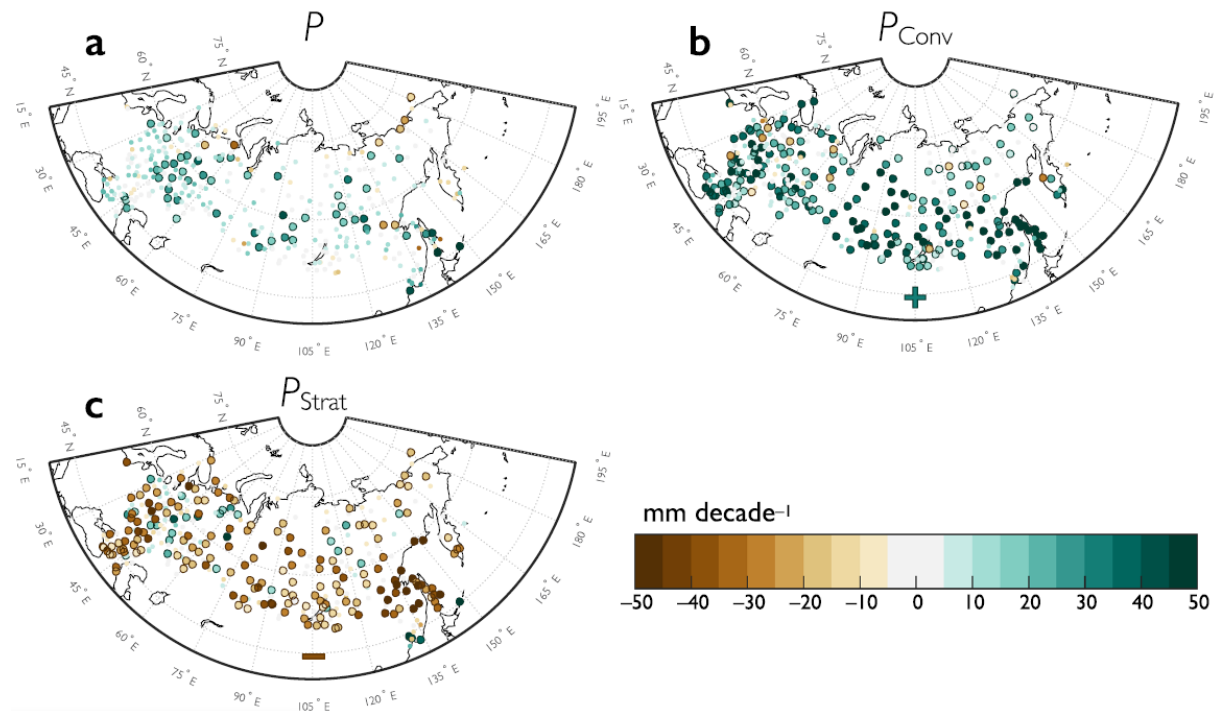


Рисунок 1.6. Тренды годовых сумм общего количества (а), конвективных (б) и обложных (с) осадков (в мм/10 лет) по данным метеорологических станций в 1966 - 2016 гг. Статистически значимые на уровне 0.05 тренды показаны крупными значками с черным контуром [Chernokulsky et al., 2019].

Большой научный и практический интерес представляют механизмы формирования экстремальных осадков в прибрежных густонаселенных регионах. Для России, это прежде всего черноморское побережье. Черное море и Северный Кавказ характеризуются метеорологическим режимом, важной особенностью которого является высокая частота

и интенсивность экстремальных метеорологических событий. Здесь ежегодно реализуется 15-20 случаев опасных явлений погоды (ураганные ветры, смерчи, ливни) [Коршунов, Шаймарданов, 2007]. По этой причине отдельные опасные гидрометеорологические явления, характерные для Черноморского побережья и гор Кавказа, являются предметом большого количества исследований [Шестакова и др. 2015; Alexeevsky et al., 2016; Коваленко и др., 2017; Алешина и др., 2018; Vyshkvarkova and Voskresenskaya, 2018; Богданович и др., 2022].

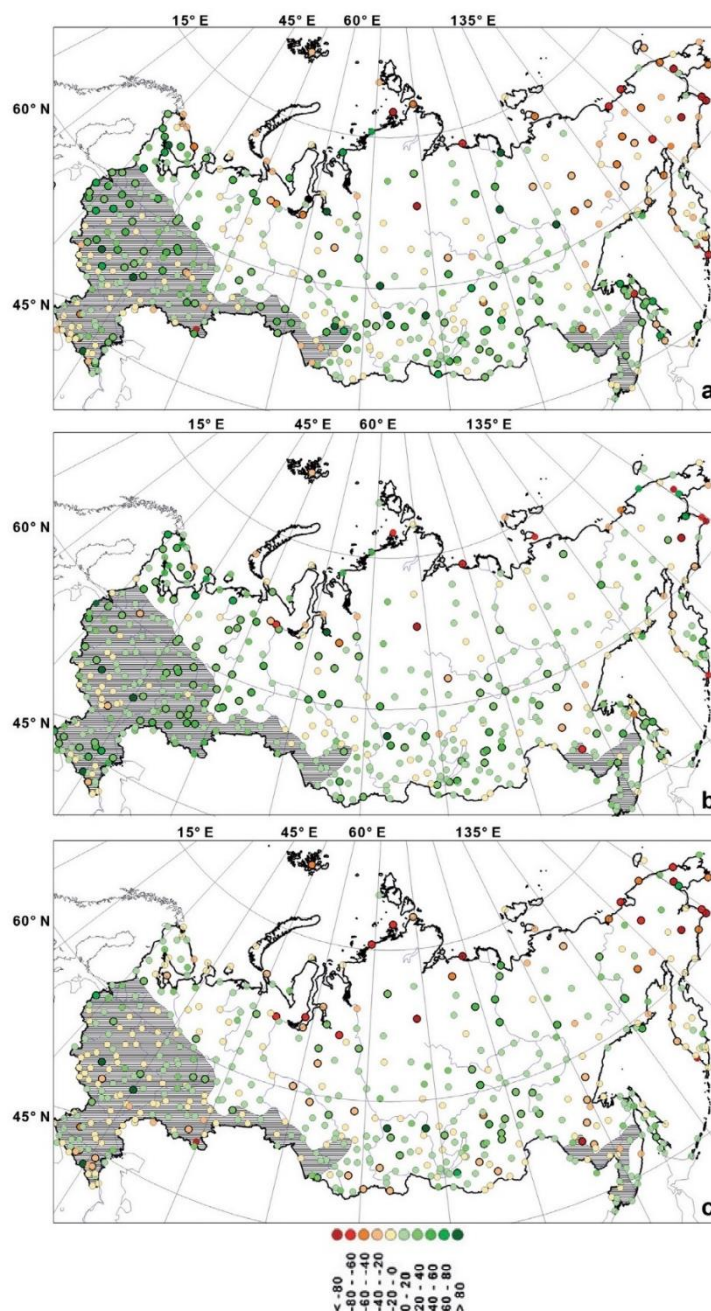


Рисунок 1.7. Разности в средней повторяемости экстремальных осадков (в %) зимой (а), весной (б) и летом (с) в 1991-2013 гг. по сравнению с 1961-1990 гг. [Zolotokrylin, Cherenkova, 2017].

Однако на фоне достаточно детальной изученности конкретных опасных гидрометеорологических явлений на Черном море и Кавказе, работ по оценке отдельных факторов и физических механизмов этих изменений существует сравнительно немного. Значительное число работ посвящено изучению факторов, влияющих на экстремальные климатические события в средних широтах с акцентом на Средиземное море и Западную Европу [Goubanova and Li, 2007; Seager et al., 2019; Volosciuk et al. 2016]. После сильного наводнения в Крымске в 2012 году были проведены численные эксперименты на чувствительность экстремальных осадков в регионе [Meredith et al. 2015a; Meredith et al. 2015b]. Получены результаты о принципиально важной роли увеличения температуры Черного моря в формировании этого экстремального события. Данная особенность подтверждается теоретическими моделями, которые прогнозируют при увеличении температуры экспоненциальный рост количества экстремальных осадков в соответствии с законом Клаузиуса-Клапейрона [Lenderink and Meijgaard, 2008; Trenberth, 2011]. В то же время, для Черноморского побережья режим осадков за последние 40 лет на фоне сильного увеличения температуры не характеризуется согласованным ростом как средних, так и экстремальных показателей [Алешина и др., 2018; Торопов и др., 2018; Ташилова, 2021; Семенов и Алешина, 2022; Croitoru et al., 2013; Vyshkvarkova, 2021]. Отмечена тенденция к усилению экстремальных осадков, однако полученные количественные оценки преимущественно статистически не значимы и характеризуются большой пространственной и сезонной неоднородностью [Алешина и др., 2018; Vyshkvarkova and Voskresenskaya, 2018].

Таким образом, на территории России ежегодно фиксируется значительное количество опасных погодных и климатических явлений. Большую актуальность в данном направлении исследований имеет вопрос о возможном влиянии процесса глобального потепления на изменение частоты или силы экстремальных погодных и климатических явлений. Поэтому важной задачей является не только изучение глобальных тенденций климатических характеристик, но и анализ региональных особенностей динамики климата, в особенности его экстремальных показателей.

1.2. Физические механизмы и факторы, влияющие на режим экстремальных осадков

Понимание механизмов возникновения сильных осадков необходимо для составления более точных климатических и метеорологических прогнозов, которые помогут уменьшить потенциальные риски от таких явлений [Sillmann et al., 2017; Masson - Delmotte et al., 2021].

Бюджет влаги в атмосфере зависит от соотношения таких параметров, как количество осадков, испарение и дивергенция потоков влаги [Wang et al., 2017b]. Дивергенция потоков влаги, и связанный с ней перенос водяного пара, в свою очередь, зависит от переноса влаги за счет адвекции, процессов конвекции и турбулентной диффузии водяного пара в горизонтальном и вертикальном направлениях [Матвеев, 1984]. Согласно данным климатического моделирования, при повышении температуры характеристики экстремальности режима осадков могут меняться даже сильнее, чем средние значения [Semenov and Bengtsson, 2002; Meehl et al., 2007; Lenderink and Meijgaard, 2008; Min et al., 2011; O’Gorman, 2012; Kharin et al., 2013]. При этом относительная редкость экстремальных осадков часто затрудняет изучение физических механизмов, ответственных за их образование и развитие. Часто в исследованиях по изменению характеристик гидрологического цикла и режима осадков производится оценка вклада динамических и термодинамических факторов в гидрологический цикл и процессы осадкообразования [Матвеева и др., 2015; Emori and Brown, 2005; Seager et al., 2010; Wang et al., 2017b; Seager et al., 2019; Seager et al., 2020]. Например, в [Seager et al., 2019; Seager et al., 2020] для регионов Северного полушария со Средиземноморским типом климата межгодовые вариации зимних осадков в значительной степени определяются внутренними модами изменчивости климата и смещением штормтреков циклонов, т.е. динамическими процессами, в то время как в Южном полушарии динамические и термодинамические факторы оказывают сравнимое воздействие [Seager et al., 2019].

При анализе региональных особенностей изменений осадков отмечается, что при повышении температуры может происходить усиление наблюдаемых контрастов в характеристиках увлажнения разных регионов: увеличение осадков в регионах с достаточным увлажнением и их дальнейшее уменьшение в засушливых областях (т.н. «wet get wetter, dry get drier» - «влажный становится влажнее,

сухой становится суше») [Held and Soden, 2006]. Однако, данная концепция подтверждается в большей мере для данных над океанами, либо для регионов суши с избыточным увлажнением [Kumar et al., 2015] и не выполняется для территорий материков в субтропиках [Sun et al., 2012; Greve et al., 2014; Byrne et al., 2015]. В исследовании [Greve et al., 2014] было показано, что данное соотношение выполняется по данным наблюдений менее чем в половине случаев над сушей, а более чем на 30% территории континентов отмечается увеличение засушливости в регионах, где ранее отмечались условия с достаточным или избыточным увлажнением (Рис. 1.8). Однако, в ряде работ показаны результаты, подтверждающие эту концепцию, например, для регионов суши без недостатка влаги [Kumar et al., 2015], в регионах высоких широт Северного полушария [Greve and Seneviratne, 2015]. Также отмечены особенности при изучении сезонных особенностей режима осадков, когда, например, осадки могут увеличиваться во влажный сезон и уменьшаться в сухой [Chou et al., 2013; Dunning et al., 2018].

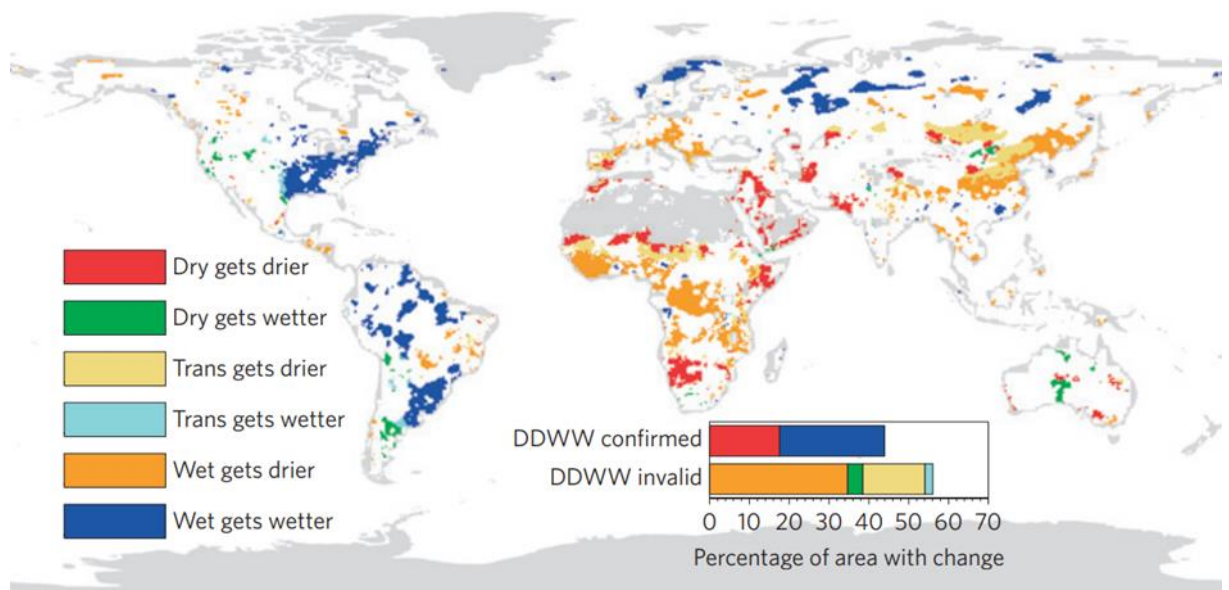


Рисунок 1.8. Результаты оценки изменения режима осадков в зависимости от засушливости региона d 1948-2005 гг. Красным и синим цветами показаны регионы, в которых выполняется концепция об усилении имеющихся условий засушливости или достаточно/повышенного увлажнения [Greve et al., 2014].

В итоге, концепция «wet get wetter, dry get drier» является сильно обобщающей и ее прямое применение без уточнений может приводить к противоречиям. В работе [Zaitchik et al., 2023] отмечается, что по сравнению с концепцией «wet get wetter, dry get drier», более эффективным подходом может выступать описание отдельных параметров и

процессов (увеличение испарения над сушей, вклад термодинамических процессов и т.д.), определяющих изменение характеристик осадков.

Согласно данным климатических моделей, при потеплении ожидается экспоненциальный рост интенсивности экстремальных осадков [Trenberth, 2011]. Такой результат объясняется законом Клаузиуса-Клапейрона. Повышение температуры может приводить к увеличению интенсивности экстремальных осадков из-за роста влагоемкости атмосферы по соотношению Клаузиуса-Клапейрона, описывающего зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры:

$$\frac{\partial p}{\partial T} = \frac{L}{T \cdot (V_2 - V_1)}, \quad (1.1)$$

где p – парциальное давление водяного пара;

L – удельная теплота парообразования;

T – температура воздуха;

V_2, V_1 – удельный объем жидкости и пара.

Такая зависимость подразумевает экспоненциальный рост интенсивности осадков при увеличении температуры [Pall et al., 2007, Trenberth, 2011, Westra et al., 2014]. Данное соотношение применимо при условии стабильности относительной влажности, поэтому важно учитывать ее возможные изменения [Sherwood et al., 2010].

В ряде работ показано, что рост интенсивности экстремальных осадков может происходить даже быстрее, чем рост влагосодержания атмосферы [Semenov and Bengtsson, 2002; Lenderink and Meijgaard, 2008] (Рис. 1.9), что может быть связано с интенсификацией конвективных процессов [Berg and Haerter, 2009; Haerter and Berg, 2009].

Однако, в ряде исследований было показано, что наблюдаемые зависимости могут существенно отличаться от теоретических оценок. Тип зависимости экстремальных осадков и температуры зависит не только от влагосодержания, но и от доступности влаги и других региональных особенностей [Hardwick Jones et al., 2010; Mishra et al., 2012; Westra et al., 2014].

Показатели экстремальности режима осадков характеризуются высокой степенью пространственной неоднородности, что делает важным проведение региональных исследований по этой проблеме. Например, согласно данным метеорологических станций и моделирования, в отдельных регионах существуют принципиальные отклонения как в

одну, так и в другую сторону от соотношения Клаузиуса-Клапейрона [Berg et al., 2009; Utsumi et al., 2011; Lenderink et al., 2017].

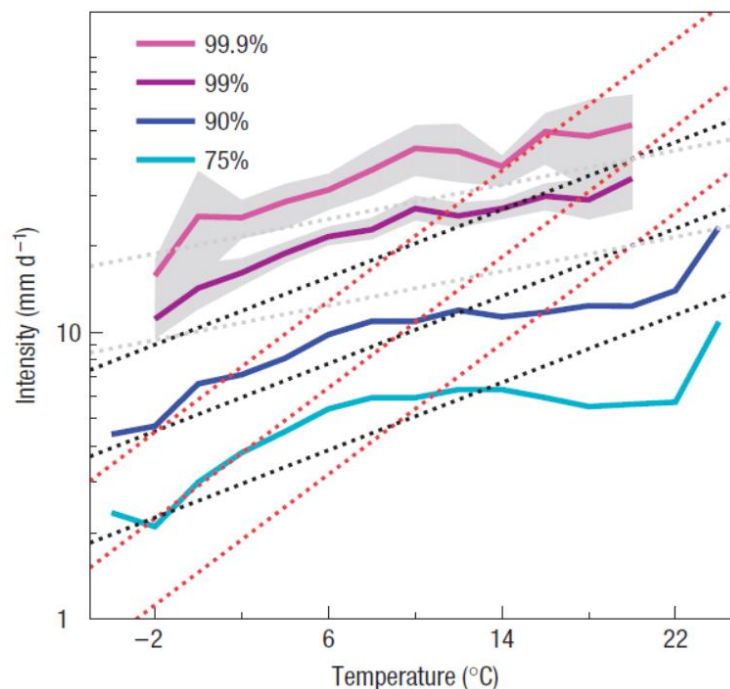


Рисунок 1.9. Значения перцентилей интенсивности осадков (мм/день, в логарифмическом масштабе) как функция температуры по наблюдениям. Сплошные линии соответствуют разным перцентильям. Пунктирные линии – отношение, полученное на основе уравнения Клаузиуса-Клапейрона [Lenderink and Meijgaard, 2008].

В последние годы на основе анализа эмпирических и модельных данных в отдельных регионах отмечается уменьшение экстремальных осадков при значительном повышении приземной температуры [Berg et al., 2009; Hardwick Jones et al., 2010; Utsumi et al., 2011]. Такие результаты получены при анализе данных стационарных наблюдений и реанализов для территории Европы [Berg et al., 2009; Drobinski et al., 2016], Австралии [Hardwick Jones et al., 2010; Bao et al., 2017], Китая [Wang et al., 2018; Huang et al., 2019], США [Mishra et al., 2012] и России [Aleshina et al., 2021].

Методика таких исследований в целом заключается в нахождении связи между значениями температуры и характерной для этой температуры интенсивностью экстремальных осадков. Показано, что в отдельных регионах при более высоких температурах может происходить уменьшение экстремальности осадков (Рис 1.10). Ослабление осадков может объясняться, например, недостатком влаги в регионе, необходимой для дальнейшей конденсации и осадкообразования [Hardwick Jones et al., 2010; Drobinski et al., 2016].

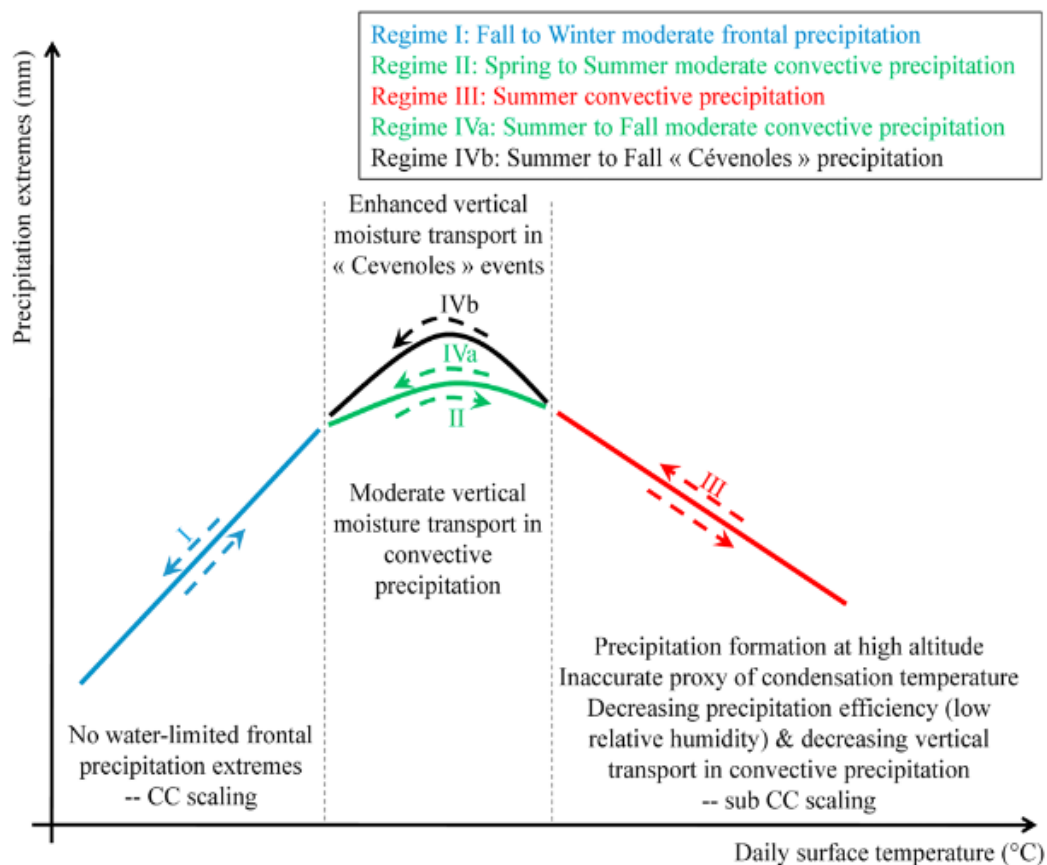


Рисунок 1.10. Типы зависимостей температуры и интенсивности экстремальных осадков, выделенные для побережья Средиземного моря во Франции: режим 1 – умеренные фронтальные осадки осенью и зимой, режим 2 – умеренные конвективные осадки весной и летом, режим 3 – летние конвективные осадки, режим 4а – умеренные конвективные осадки летом и осенью, режим 4b – летние и осенние события с экстремальными осадками [Drobinski et al., 2016].

Для России гипотеза о зависимости интенсивности осадков от температурного режима исследовалась лишь косвенно на основе сеточных архивов данных при проведении глобальных оценок [Utsumi et al. 2011; Wang et al., 2017a; Ali et al., 2018]. В Главе 2 проведена работа по изучению особенностей связи экстремальных осадков с температурой в последние десятилетия на территории России с использованием данных стационарных наблюдений и реанализа. Важной особенностью данного исследования является изучение отклика интенсивности экстремальных осадков на рост температуры для осадков разных типов – ливневых и обложных (для стационарных данных) или конвективных и крупномасштабных (для данных реанализа) [Aleshina et al., 2021].

Изменения общей циркуляции атмосферы и ее статической устойчивости (динамический фактор изменения осадков) могут усиливать осадки в одних регионах и

приводить к их ослабеванию в других [O'Gorman and Schneider, 2009; Sugiyama et al., 2010; Pfahl et al., 2017]. Циклоническая активность и характеристики антициклонов, в особенности повторяемость и изменчивость атмосферных фронтов и блокингов, способна формировать значительные погодно-климатические аномалии регионального масштаба [Акперов, Мохов, 2023; Berry et al., 2011; Hénin et al., 2019; Voskresenskaya and Vyshkvarkova, 2016]. Изменение характеристик общей циркуляции атмосферы в средних широтах, связанное с расширением тропиков и изменениями размеров и интенсивности ячейки Хедли [Lu et al., 2009; Seidel et al., 2008; Grise and Davis, 2020] также может служить причиной увеличения или уменьшения осадков в том или ином регионе.

Сравнение результатов оценок циклонической активности в разных регионах мира осложняется различиями в выборе ключевых характеристик циклонов (интенсивность, повторяемость, размер, характеристик траекторий), а также в использовании разных технологий детектирования циклонов [Акперов и др., 2007; Акперов, Мохов, 2023; Бардин и др., 2021; Вязилова и Вязилов, 2018; Кононова, 2014; Матвеева и др., 2015]. Например, анализ повторяемости циклонов умеренных широт Северного полушария показал преимущественно статистически не значимые тенденции повторяемости циклонов зимой, в районе Северной Атлантики отмечены декадные колебания, хорошо коррелирующие с изменениями индекса Северо-атлантического колебания (САК), а в северной части Тихого океана – с изменениями Северо-тихоокеанского индекса Тренберта и Хёррелла [Бардин и др., 2021]. Однако, для Северной Атлантики и Европы показано увеличение доли экстремально глубоких циклонов, сопровождающихся высокой интенсивностью атмосферных осадков [Вязилова и Вязилов, 2018]. По оценкам [Акперов, Мохов, 2023], вклад интенсивных внетропических циклонов Северного полушария в формирование осадков достигает 60% зимой и около 35% летом.

Также анализ данных метеорологических станций на побережье Российского сектора Арктики показал, что выпадение крайне экстремальных осадков в регионе связаны со случаями проникновения влажного теплого воздуха из Атлантики в системы интенсивных циклонов [Кислов и др., 2021]. Отмечено, что в XXI веке повторяемость условий, сопровождающих случаи экстремальных осадков фронтального происхождения на Арктическом побережье России в условиях глобального повышения температуры может возрасти для холодного полугодия [Матвеева и др., 2015; Kislov et al., 2022].

В [Богданович и др., 2021] отмечается роль выхода средиземноморских мезоциклонов на побережье Черного моря как важного фактора формирования экстремальных осадков в регионе. По данным климатических моделей на побережье юга Европейской России в XXI веке повторяемость условий, сопровождающих случаи экстремальных осадков фронтального происхождения и связанных с ними наводнений в регионе может уменьшиться зимой и увеличиться летом [Матвеева и др., 2013; Матвеева и др., 2015].

При изучении режима осадков также необходимо оценивать повторяемость и продолжительность периодов без осадков, которые могут устанавливаться при антициклонах, приводя к продолжительным засухам. В [Мохов, Петухов, 1997] по данным наблюдений в 1950-1990 гг. была отмечена тенденция увеличения характерного времени жизни блокингов в атмосфере внетропических широт Северного полушария в условиях повышения температуры. В работе [Кононова, 2014] показано, что период 1998 – 2012 гг. отличается наибольшим количеством одновременных блокирующих процессов в Северном полушарии в целом и в России в частности. Это приводит к увеличению продолжительности жизни антициклонов на континентах зимой и летом, что в свою очередь влечет за собой увеличение годовой амплитуды температуры воздуха. Для юга ЕТР за этот период характерно чередование засух, связанных со стационарированием антициклона, и сильных осадков, образующихся в результате выхода циклонов с восточного Средиземноморья. Увеличение продолжительности блокингов в Северном полушарии в 1969-2011 гг. отмечено в [Мохов и др., 2013] как для зимнего, так и для летнего сезонов, а в [Мохов, Тимажев, 2019] по моделям CMIP5 для XXI в. выявляется риск увеличения повторяемости блокингов при потеплении. В [Бардин и др., 2019] обсуждается вопрос взаимосвязи изменений повторяемости антициклонов и блокингов в умеренных широтах Северного полушария с модами общей циркуляции атмосферы. Также на интенсивность циклонов умеренных широт может оказывать влияние изменение потоков скрытого и явного тепла и уменьшение площади морских льдов в Арктике [Semmler et al., 2016; Tilinina et al., 2018].

Таким образом, изучение особенностей режима осадков требует многостороннего подхода с использованием различных источников данных, оценкой факторов, определяющих условия формирования экстремальных событий, а также с учетом региональных особенностей территории.

1.3. Обзор источников метеорологических данных

Анализ изменения климатического режима на территории России проводился по нескольким источникам данных. За основу были взяты данные наблюдений сетевых метеорологических станций из архива ВНИИГМИ-МЦД. Также использовались данные суточного разрешения E-OBS и архива среднемесячных температур и осадков CRU TS v. 4.06 (Climatic Research Unit). Для получения данных в свободной атмосфере и в регионах, слабо освещенных сетью постоянных метеорологических наблюдений, были использованы реанализы Era-Interim и ERA5, а также архив глобального проекта климатических осадков GPCP. На основе этих данных был проведен анализ наблюдаемых изменений климата на территории России и в отдельных регионах страны. Анализ возможных изменений климатических параметров в XXI в. проводился с помощью климатических моделей CMIP6.

Массив данных ВНИИГМИ-МЦД содержит сведения о температуре воздуха на 2 м и суточных суммах осадков на 538 метеорологических станциях России [Булыгина и др., 2014; meteo.ru], в диссертации используются данные по среднесуточным температурам и суточным суммам осадков за период с января 1966 по сентябрь 2022 года.

В Главе 2 при изучении связи интенсивности экстремальных осадков и температуры используются данные архива суточных сумм осадков, разделенных на ливневые и обложные типы, что позволяет провести более подробный анализ не только для суточных сумм осадков, но и отдельно для осадков разного происхождения. Типы осадков выделялись с использованием срочных данных наземных наблюдений за осадками, характером погоды в срок и между сроками наблюдений, морфологическим типом облачности [Чернокульский и др., 2018; Chernokulsky et al., 2019]. Блок-схема разделения осадков на типы представлена на Рис. 1.11. Частично схожий подход был реализован при анализе разных типов осадков для данных метеорологических станций на территории Европы [Haerter and Berg, 2009] и Южной Кореи [Park, Min, 2017].

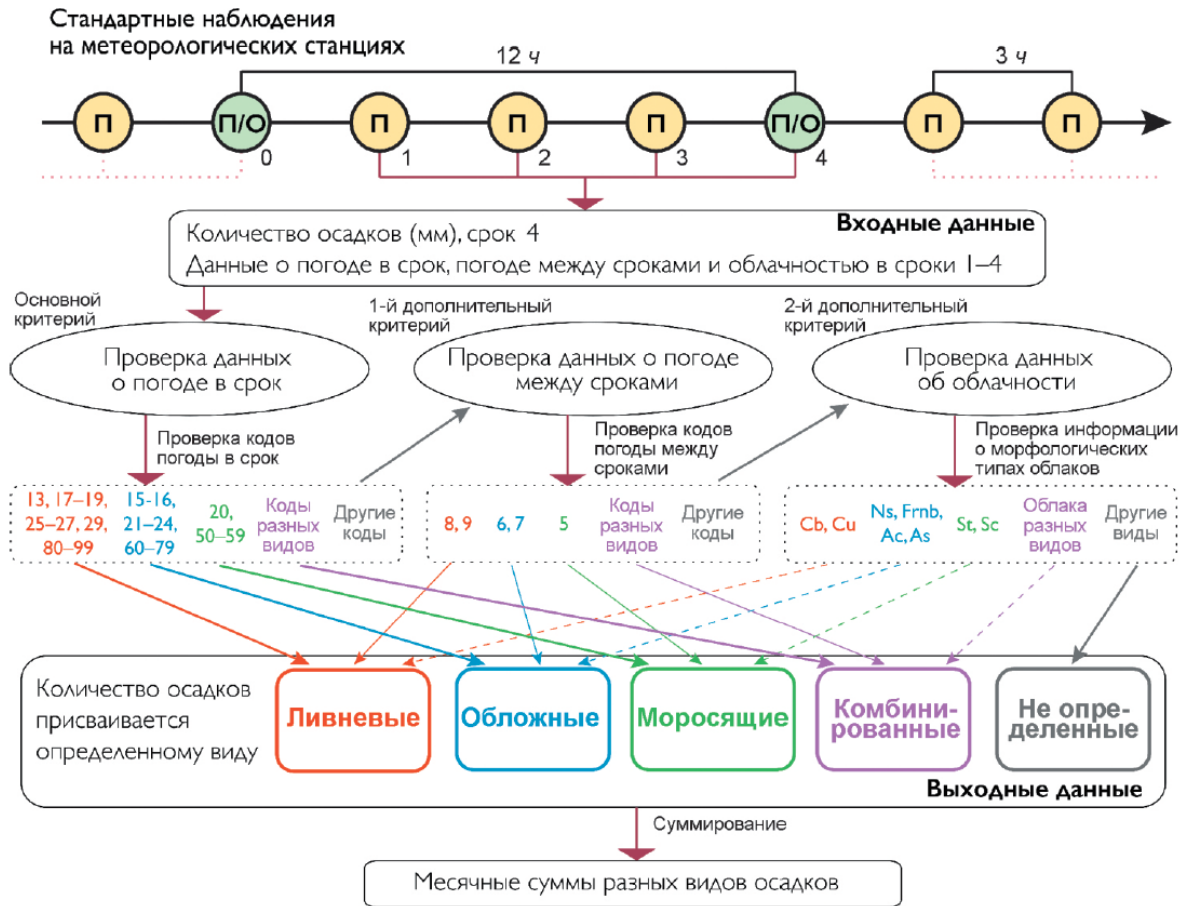


Рисунок 1.11. Алгоритм определения месячных сумм ливневых, обложных и морозящих осадков по данным срочных стационарных наблюдений [Чернокульский и др., 2018]

На базе Университета Восточной Англии создан массив сеточных данных *Climatic Research Unit (CRU)*, содержащий среднемесячные данные о приземной средней, минимальной, максимальной температурах, ежемесячных суммах осадков, облачности, влажности воздуха. Основным источником информации для этого архива выступает массив стационарных наблюдений, которые представлены в регулярной сетке. Число всех использованных станций составляет примерно 2500, но с 1991 года их количество снизилось по разным оценкам до 800-1000. Массив постоянно пополняется и уточняется, раз в несколько лет выпускаются новые версии архива. Последняя обновленная версия массива CRU TS v. 4.06 стала доступной для анализа в мае 2022 года и охватывает период 1901-2021 гг. [Harris et al., 2020]. Данные покрывают всю поверхность суши, кроме Антарктиды. Горизонтальное разрешение составляет $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.

Все переменные, представленные в архиве, можно поделить на две группы: переменные первого класса (осадки, средняя температура), которые получены только на

основе наблюдений на метеорологических станциях и второго класса (облачность, влажность воздуха), которые являются результатом использования как данных наблюдений, так и эмпирических зависимостей. Температура и осадки представляют собой хороший независимый набор данных, который часто используется при проведении оценок качества данных спутниковых измерений, глобальных и региональных архивов данных [Sun et al., 2018; Ward et al., 2011].

Набор данных *GPCP (Global Precipitation Climatology Project)* создан в результате вариационного усвоения всех видов измерений атмосферных осадков (наземные осадкомеры, радиолокаторы, спутниковые данные в микроволновом диапазоне, и т.д.) [Adler et al., 2018]. Во многих работах, в частности, в [Игнатов, 2006; Торопов, 2006] показано, что данный архив точно отражает пространственно-временную изменчивость поля осадков, в частности, в Евразии. Существенным недостатком, правда, следует считать достаточно низкое по современным меркам пространственное разрешение – данные доступны на регулярной сетке с разрешением $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ с шагом в один месяц за период 1979-2020 гг. В дополнение к информации о среднемесячном режиме осадков, также доступны оценки неопределенностей проведенного анализа осадков.

Архив E-OBS использовался в Главе 4 при сравнении с данными экспериментов модели ECHAM5. Данные по средней, максимальной, минимальной температурам, суммах осадков, давлению на уровне моря, скорости ветра, относительной влажности и составляющих радиационного баланса представлены с суточным разрешением за период 1950-2018 гг. (версия 19.0e). Данные представлены на регулярной сетке с горизонтальным разрешением $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ или $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ для региона $25^\circ \text{с.ш.} - 71.5^\circ \text{с.ш.}$ и $25^\circ \text{з.д.} - 45^\circ \text{в.д.}$ [Cornes et al., 2018].

В главе 4 при анализе влияния глобального и регионального повышения температуры поверхности океана на режим осадков на черноморском побережье Кавказа исследуются результаты численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы ECHAM5. Численная спектральная модель общей циркуляции атмосферы ECHAM5 относится к пятому поколению модели общей циркуляции атмосферы, берущей свое начало от спектральной численной модели прогноза погоды Европейского центра Среднесрочных прогнозов погоды с современными параметризациями мезомасштабных физических процессов, доработанными на базе Метеорологического Института Макса

Планка (Германия, Гамбург). Конфигурация модели позволяет применять ее для различных климатических приложений. Подробное описание модели приведено в [Roeskner et al., 2003]. При проведении анализируемых в работе экспериментов использовалась модификация модели с горизонтальным разрешением T159, приблизительно соответствующее размерам модельной ячейки $0.7^\circ \times 0.7^\circ$ широты/долготы (480 узлов по долготам и 240 по широте), по вертикали переменные рассчитаны для 19 уровней. В данной версии модели такая конфигурация горизонтальной сетки является самой подробной, что позволяет максимально реалистично воспроизвести характеристики экстремальных осадков [Volosciuk et al., 2015]. При проведении более крупномасштабных экспериментов могут использоваться менее детальные варианты сеток, например, при изучении отклика характеристик осадков в 21 веке (при разных сценариях антропогенного воздействия) на территории крупных речных бассейнов России использовалась сетка со спектральным разрешением T63 (192 узлов по долготам и 96 по широте). Результаты экспериментов показали увеличение суточной интенсивности осадков и экстремальных осадков в бассейнах крупных рек Северной Евразии (Волга, Обь, Енисей, Лена), особенно в зимний сезон [Khon et al., 2007].

Для сравнения пространственной структуры на (Рис. 1.12) показано распределение средних сумм осадков в 1981-2010 гг. по данным GPCP, CRU TS и E-OBS для летнего и зимнего сезонов. Сеточные архивы различаются по горизонтальному разрешению, архив GPCP сильнее всего отличается вследствие самого большого шага данных по пространству $2.5^\circ \times 2.5^\circ$. При этом основные сезонные особенности в приведенных архивах приведены верно. Зимой наибольшее количество осадков в приведенном регионе выпадает на наветренных склонах Скандинавских гор, на восточных побережьях Адриатического, Эгейского и Средиземного морей. Летом количество осадков в среднем выше, чем зимой (особенно в Восточной Европе), повышенным выпадением осадков характеризуются горные системы Альп и Карпат. В архивах с более подробным разрешением CRU TS и E-OBS лучше выделяются повышенные суммы осадков и в небольших горных системах.

В дополнение к данным метеорологических станций в работе были использованы данные реанализов Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) ERA-Interim [Dee et al., 2011] и ERA5 [Hersbach et al., 2018].

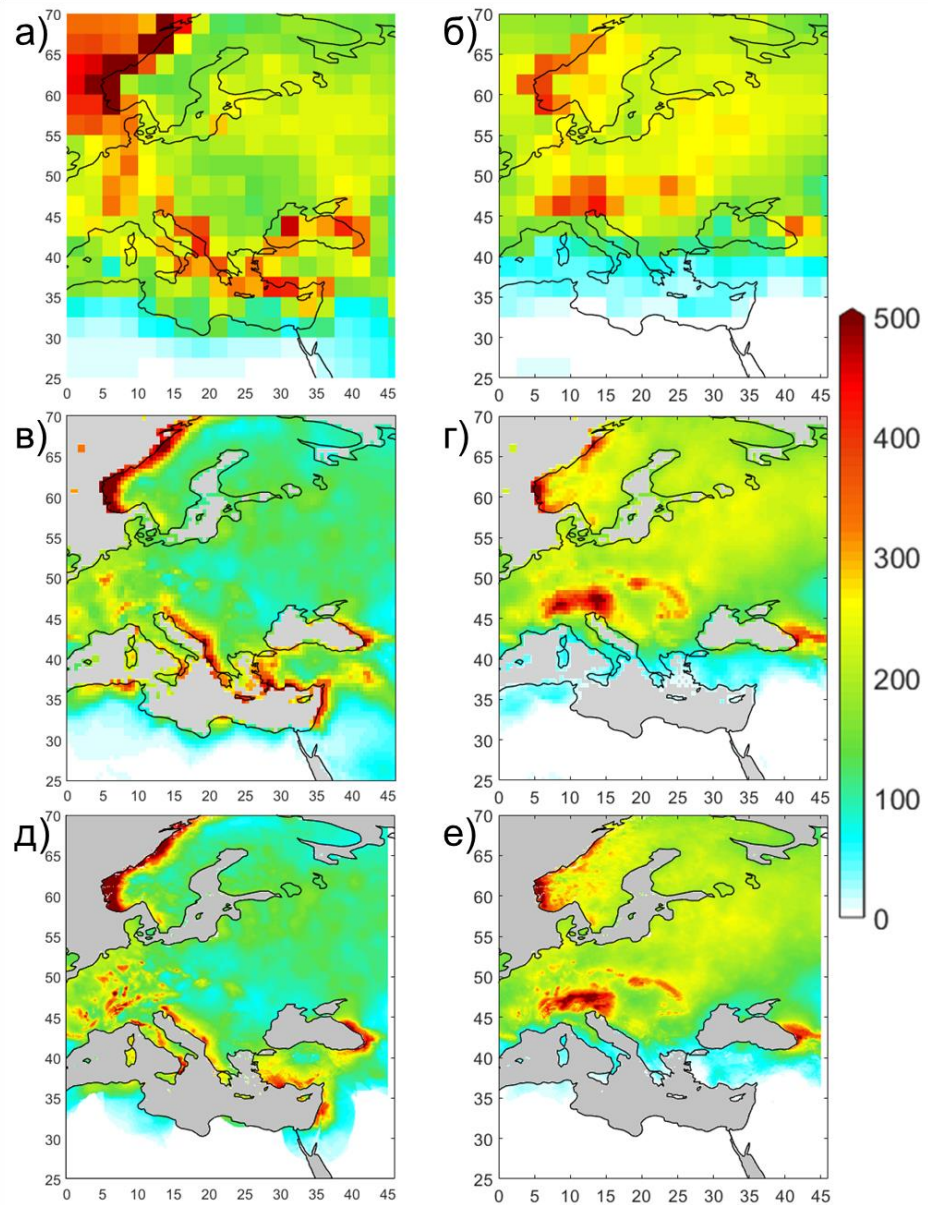


Рис. 1.12. Средние суммы осадков (в мм/сезон) по данным GPCP (а, б), CRU TS v.4.06 (в, г), E-OBS (д, е) в 1981-2010 гг. зимой (а, в, д) и летом (б, г, е).

Реанализ – это процедура четырехмерного усвоения всех видов данных метеорологических наблюдений (метеостанций, аэрологические наблюдения, спутниковые, самолетные, судовые, радиолокационные данные, и т.д.) с использованием численной модели прогноза погоды. Четырехмерным усвоение называется потому, что трехмерные поля метеорологических величин усваиваются моделью с определенным шагом по времени (в идеале соответствующим промежутку между сроками наблюдений). В результате получаются четырехмерные поля («срок», «вертикальный уровень», «широта», «долгота») всех метеорологических данных. В настоящее время число параметров, выдаваемых прогностическими моделями, превышает 300.

Реанализ ERA-Interim – это источник глобальных данных о состоянии атмосферы с января 1979 года по август 2019 года [Dee et al 2011]. Реанализ является продуктом системы ассимиляции данных IFS (Cy31r2), которая непрерывно собирает данные наблюдений с Глобальной системы телесвязи (ГСТ) и других источников. Процесс создания реанализа включает в себя четырехмерный вариационный анализ (4D-Var) с шагом по времени 12 часов. Пространственное разрешение данных $0.75^\circ \times 0.75^\circ$, что составляет около 80 км (расчеты выполняются на спектральной сетке T255), переменные представлены на 60 вертикальных уровнях от поверхности до 0,1 ГПа. Результаты анализа доступны каждые 6 часов (0, 6, 12, 18 UTC), прогнозы – два раза в день (0 и 12 UTC).

Реанализ ERA5 пришел на смену реанализу ERA-Interim и представляет собой продукт Европейского центра среднесрочных прогнозов (ECMWF) пятого поколения, данные по которому охватывают последние восемь десятилетий начиная с 1940 года по настоящее время [Hersbach et al., 2018]. По сравнению с реанализом ERA-Interim, в ERA5 используется улучшенная версия системы ассимиляции данных (IFS Cycle 41r2), включающая современные параметризации конвективных процессов и микрофизики облаков. Данные ERA5 представлены на регулярной сетке $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ для переменных у поверхности и на изобарических уровнях (всего 137 вертикальных уровней) с временным шагом в 1 час, при формировании запросов также доступны среднемесячные оценки.

Для изучения климата будущего в работе анализируются данные тридцати четырех моделей общей циркуляции атмосферы и океана, которые входят в международный проект сравнения моделей климата **CMIP6** (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*) [Eyring et al., 2016]. Всего в проекте участвует более 60 моделей (среди которых содержатся в том числе разные версии одних и тех же модельных систем), предоставляющих для анализа различные по полноте наборы данных. Одной из основных целей проекта CMIP6 является организация и проведение скоординированных численных экспериментов с климатическими моделями исследовательских групп, расположенных в разных странах мира. От Российской Федерации в данных проектах на данный момент участвует единственная глобальная модель климата, развиваемая в Институте вычислительной математики (ИВМ) РАН [Володин и др., 2016]. В работе использовались данные численных экспериментов для исторического периода (1850-2014 гг.) и для двух сценариев антропогенного воздействия SSP245 и SSP585 (2015-2100 гг.) [Van Vuuren et al., 2014]. Сценарий SSP245

подразумевает удерживание эмиссий примерно на современном уровне до середины века и последующее их снижение, в результате чего внешнее радиационное воздействие достигает максимума в 4.5 Вт/м^2 к 2080-м гг. Сценарий SSP585 описывает будущее развитие общества и экономики без сдерживания роста эмиссий парниковых газов с примерным удвоением эмиссий парниковых газов к середине XXI в. и монотонным ростом антропогенного радиационного воздействия с современных значений 2.5 Вт/м^2 до 8.5 Вт/м^2 к концу века. Это самый агрессивный по интенсивности сценарий из всех, используемых в экспериментах с моделями CMIP6, дающий верхнюю оценку возможных изменений климата вследствие антропогенного воздействия.

При использовании любых сеточных архивов существуют ошибки, связанные с процедурой интерполяции, поэтому невозможно получить идеальной согласованности сеточных архивов и реанализов с данными стационарных наблюдений. Поэтому при анализе сеточных архивов часто рассматривают общую пространственную структуру и ее изменение, а не конкретные значения в точках.

Проведению сравнений разных источников данных и изучению ошибок воспроизведения сеточных архивов посвящено немалое количество работ [Григорьев и др., 2022; Adler et al., 2017; Jiao et al., 2021; Nogueira, 2020; Sun et al., 2018].

В [Sun et al., 2018] проведено сравнение 30 источников гидрометеорологических данных (данные наблюдений, сеточные архивы, реанализы, спутники), для каждого из которых даны количественные оценки ошибки воспроизведения осадков. Оценки годовых сумм осадков и их пространственного распределение по данным CRU, GPCP, ERA-Interim характеризуются хорошей степенью согласованности над сушей (коэффициенты корреляции выше 0.9 для CRU, GPCP и выше 0.8 для ERA-Interim), при этом для реанализов отмечено завышение годовых сумм осадков над горными территориями. Для суточных сумм осадков было проведено сравнение не только средних интенсивностей осадков, но и функции распределения вероятностей осадков. Для источников, базирующихся на данных осадкомерных реек и спутников, отмечено завышение экстремальных осадков в Африке, южной Азии и южной Америке по сравнению с данными реанализов (кроме MERRA). Самое большое занижение экстремальных осадков в реанализах отмечено для NCEP1 и ERA-Interim, также различия в оценках экстремальных осадков выше для засушливых регионов, чем для регионов с избыточным увлажнением и высоких широт.

Для архива GPCP средняя глобальная интенсивность осадков в 1979-2014 гг. составила 2.69 мм/день (2.89 мм/день над океаном и 2.24 мм/день над континентами) с величиной ошибки воспроизведения для глобальных оценок $\pm 7\%$, с максимальными значениями в 10-15% в западной части тропических широт Тихого океана [Adler et al., 2017]. Для реанализов ERA-Interim и ERA5 в 1979-2018 гг. аналогичная глобальная оценка выше и составляет 2.93 мм/день и 2.91 мм/день, соответственно [Nogueira, 2020]. Наибольшее завышение осадков для реанализа ERA5 отмечено для океанических областей в тропических широтах, а также Гималаев и Анд, занижение – для Норвежского моря и прибрежных регионов Южной Америки. При анализе суточных интенсивностей осадков ERA5 по сравнению с данными метеорологических станций для периода 2001-2020 гг. также получено завышение суточных осадков в ERA5 на величину от 0.14 мм/день в июле до 0.26 мм/день в апреле, наименьшие различия отмечены во внетропических широтах зимой, а наибольшие – для тропиков [Lavers et al., 2022]. Отмечено, что реанализ ERA5 занижает суточные интенсивности экстремальных осадков, но верно воспроизводит их пространственное распределение, что позволяет использовать данные этого реанализа для исследований осадков во внетропических широтах в качестве дополнительного источника данных. Региональные оценки архива E-OBS и ERA5 для Альп, Карпат и Фенноскандии показали хорошее согласие с данными наблюдений как для средних значений, так и для повторяемости дней с осадками и интенсивностей экстремальных осадков [Bandhauer et al., 2022]. Показано, что завышение суточных осадков в ERA5 происходит за счет увеличенной повторяемости дней с осадками. Данные E-OBS сильно зависят от плотности наблюдательной сети, наибольшие ошибки отмечены для регионов с низким числом станций, использованных при формировании архива. Важную роль в воспроизведении осадков оказывает топография и особенности подстилающей поверхности, например, для северо-востока США реанализ ERA5 занижает суточные суммы осадков на побережье Атлантики и завышает в отдаленных от побережья регионах (до 10% зимой и весной), при этом отмечено хорошее согласие с данными наблюдений для экстремальных осадков [Crossett et al., 2020], для остальной территории США в [Tarek et al., 2020] отмечена высокая точность воспроизведения осадков и возможность использования данных для гидрологических задач.

Для территории России также получено завышение осадков в реанализе ERA5 по сравнению с данными метеостанций в среднем на 0.27 мм/день [Григорьев и др., 2022].

При этом сильнее всего суточные суммы осадков превышаются весной на юге Западной и Восточной Сибири. Также отмечено, что сильнее всего превышаются осадки в засушливых регионах в сезоны с наименьшим количеством осадков. Летом преобладают наименьшие величины относительной систематической ошибки.

Модели CMIP6 различаются как по горизонтальному и вертикальному разрешению, так и по набору описываемых процессов, обратных связей и используемых параметризаций [Eyring et al., 2016]. С каждым новым этапом в проект вовлекается больше научных групп и климатических моделей, в программу проекта вносятся новые эксперименты, используются новые параметризации, а часть процессов начинает описываться явными способами. Климатические модели также характеризуются различными недостатками и неточностями в воспроизведении климатических параметров. Для уменьшения ошибок в климатических оценках разрабатываются различные методы оценки качества воспроизведения параметров моделями и учета межмодельных различий [Knutti et al., 2017; Pfahl et al., 2017; Sillmann et al., 2017]. Оценки качества воспроизведения экстремальных осадков климатическими моделями CMIP6 проводилось в [Martel et al., 2020; Vogel et al., 2020; Klein et al., 2021; John et al., 2022].

Таким образом, на данный момент существует значительное количество данных по осадкам, все они обладают различными преимуществами и недостатками. Данные наблюдений дают наиболее точную информацию о режиме осадков в точке станции, в дополнение к данным метеорологических станций при анализе пространственной структуры осадков часто используются данные сеточных архивов данных, реанализов и климатических моделей. Таким образом, использование разных источников данных по осадкам могут помочь выстроить более полную картину изменений режима осадков. При количественной оценке режима осадков в первую очередь проводится анализ имеющихся данных метеорологических наблюдений и сеточных архивов, созданных на основе данных прямых метеорологических наблюдений, реанализы и данные климатических моделей можно рассматривать в качестве источников дополнительной информации о вероятных тенденциях для регионов, в которых отсутствуют более качественные данные.

Глава 2. Связь экстремальных осадков разных типов с приземной температурой в России по стационарным данным и реанализам

Проведено исследование связи суточной интенсивности экстремальных осадков и приземной температуры воздуха в 1966-2017 годы по данным метеорологических станций и в 1979-2020 годы по реанализу ERA5 на территории России. Рассматриваются данные как по общему количеству осадков, так и отдельно для конвективных и крупномасштабных типов осадков. Показано, что зимой преимущественно происходит увеличение экстремальных осадков всех типов при повышении температуры в соответствии с соотношением Клаузиуса-Клапейрона. При этом для Дальнего Востока зафиксировано двойное превышение соотношения Клаузиуса-Клапейрона для обложных осадков. Летом по данным станций и реанализа в большинстве регионов получено нелинейное увеличение экстремальных осадков, которое сменяется на их уменьшение при температурах выше 15-20°C, отчетливее всего эта особенность выражена на юге Европейской территории России для конвективных осадков. Также при увеличении температуры происходит уменьшение относительной влажности даже в случае экстремальных осадков. Таким образом, при высоких температурах важным фактором осадкообразования начинает выступать доступность дополнительных источников влаги, а также региональные особенности циркуляции атмосферы. Представленные результаты подчеркивают многогранность факторов, влияющих на образование экстремальных осадков на территории России. Приведенное исследование может выступать как дополнительный источник информации об особенностях режима экстремальных осадков разных типов на территории России.

2.1. Используемые данные и методы

В данной главе приведены результаты исследования связи интенсивности экстремальных осадков разных типов в зависимости от температурных условий по данным метеостанций России и реанализа ERA5 для последних десятилетий.

В работе используются данные 538 метеорологических станций архива ВНИИГМИ – МЦД [meteo.ru] за период 1966-2017 гг. [Булыгина и др., 2014] и архива суточных сумм осадков, разделенных на ливневые и обложные типы [Чернокульский и др., 2018; Chernokulsky et al., 2019], что позволяет провести более

подробный анализ не только для суточных сумм осадков, но и отдельно для осадков разного происхождения.

В дополнение к данным метеорологических станций был проведен анализ данных реанализа ERA5 за период 1979-2020 гг. [Hersbach et al 2018]. В частности, были использованы данные о суточных интенсивностях осадков (общего количества, а также отдельно осадков конвективного и крупномасштабного типов), температуре воздуха на 2 метрах, температуре точки росы, атмосферном давлении и удельной влажности у поверхности. На основе этих данных был произведен расчет относительной влажности у поверхности по данным реанализа ERA5.

Анализ связи между средней температурой и характерной для нее величиной экстремальных суточных сумм осадков проводился с использованием методики, описанной в работе [Hardwick Jones et al 2010]. Для каждой метеорологической станции или узла реанализа ряды суточных сумм осадков и температуры разбиваются на интервалы таким образом, чтобы в каждом из них было по 200 значений осадков (использовались дни с суточными суммами осадков ≥ 0.1 мм). Таким образом, диапазоны температур в каждом интервале различаются при равном размере выборки. Размер температурного диапазона в среднем составляет $0.4-0.6^{\circ}\text{C}$, сужается до 0.1°C для наиболее часто встречающихся температур и расширяется до 6°C при крайне высоких и низких температурах на станции или в узле реанализа. Данный подход с использованием неравномерных интервалов температуры позволяет избежать проблем с недостатком значений при самых низких и высоких температурах, а также обеспечивает одинаковый размер выборки при вычислении критериев экстремальности осадков. Аналогичный подход использовался в работах [Hardwick Jones et al., 2010; Bao et al., 2017; Ali et al., 2018].

Для каждого диапазона рассчитывается средняя температура и экстремальное количество осадков. В качестве показателя экстремальных осадков для каждого диапазона вычислялось значение 95%-го перцентиля эмпирического распределения осадков за весь исследуемый период отдельно для каждого сезона и каждой станции.

На первом этапе проводилась аппроксимация зависимости между температурой (T_m) и логарифмом экстремальных осадков ($\log(P95)$) с помощью линейных функций для оценки соответствия соотношению Клаузиуса-Клапейрона. Для случаев, когда линейная зависимость не отражала все особенности полученной зависимости, использовалась

аппроксимация квадратичными функциями. Квадратичная функция была выбрана как первое приближения нелинейной зависимости при исследовании связи температуры и осадков. Такой подход позволил изучить возможный нелинейный отклик осадков на рост температуры. Таким образом, выделялись четыре типа связи: линейное увеличение или уменьшение логарифма экстремальных осадков при увеличении температуры, увеличение осадков, которое сменяется уменьшением при превышении некоторого порогового значения температуры (квадратичная функция, выпуклая вверх парабола), уменьшение осадков, которое сменяется увеличением при превышении некоторого порогового значения температуры (квадратичная функция, выпуклая вниз парабола) (Рис. 2.1).

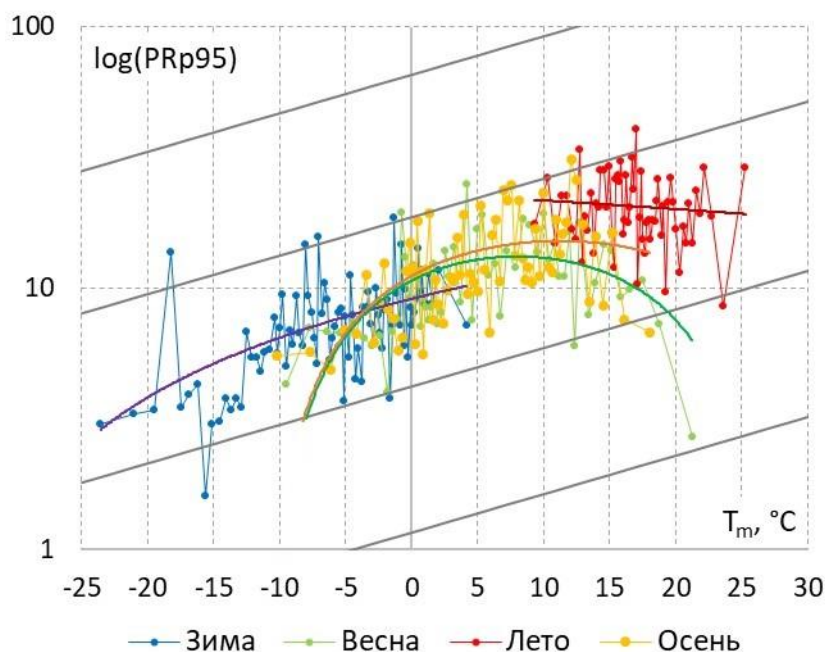


Рисунок 2.1. Значения 95%-х перцентилей интенсивности экстремальных осадков ($\log(PRp95)$) как функция средней суточной температуры (T_m) зимой (синий), весной (зеленый), летом (красный) и осенью (желтый) по данным метеорологической станции Рязань. Сплошными серыми линиями показаны соотношения Клаузиуса-Клапейрона.

Для случаев линейной зависимости в дальнейшем анализе были использованы только те станции и узлы реанализа, для которых данная аппроксимация была статистически значима на уровне 0.05 (t-критерий Стьюдента). Стоит отметить, что в отдельных случаях для регионов, в которых уменьшение интенсивности экстремальных осадков начинается только при самых высоких температурах, статистически значимыми могут быть как линейная, так и квадратичная зависимость. Квадратичный тип аппроксимации выбирался

при условии меньшего значения среднеквадратической ошибки данной аппроксимации по сравнению с линейной. Вторым условием для выбора квадратичной аппроксимации являлось расположение точки перегиба (вершины параболы) внутри диапазона исследуемых температур. Важно отметить, что тестируемая аппроксимация не является строгим отражением физического закона, определяющего изменение экстремальных осадков при увеличении температуры, но показывает вид зависимости для анализируемого диапазона температур.

2.2. Проверка соответствия изменений экстремальных осадков соотношению Клаузиуса-Клапейрона¹

Согласно соотношению Клаузиуса-Клапейрона, влагосодержание атмосферы (давление насыщения водяного пара) растет по экспоненциальной зависимости при увеличении температуры [Матвеев, 1984; Lenderink and Van Meijgaard, 2008; Trenberth, 2011]. Из этого следует, что логарифм интенсивности экстремальных осадков может линейно увеличиваться при росте температуры. Была проведена проверка, насколько данная закономерность выполняется по данным метеорологических станций и реанализа. На (Рис. 2.2) представлены значения коэффициентов линейной аппроксимации (линейных трендов) значений логарифма экстремальных осадков как функции средней температуры (для каждого диапазона) по данным метеорологических станций и реанализа ERA5. Согласно соотношению Клаузиуса-Клапейрона влагоемкость атмосферы и, как можно предположить, логарифм интенсивности осадков, в том числе экстремальных, увеличивается линейно при росте температуры. Скорости увеличения в диапазоне 6-8% на 1°C указывают на хорошее соответствие с теоретическими оценками соотношения Клаузиуса-Клапейрона для суточных интенсивностей осадков. Однако, на представленных рисунках ожидаемые соотношения отмечаются лишь в небольшом ряде регионов, результаты также сильно зависят от времени года.

Зимой соотношение Клаузиуса-Клапейрона соответствует расчетам преимущественно для станций и узлов реанализа в азиатской части страны (п-ов Таймыр, северо – восточная Сибирь, южная Сибирь и Дальний Восток).

¹ Разделы 2.2. и 2.3 подготовлены на основе статьи Aleshina M. A., Semenov V. A., Chernokulsky A. V. A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data //Environmental Research Letters. – 2021. – Т. 16. – №. 10. – С. 105004.

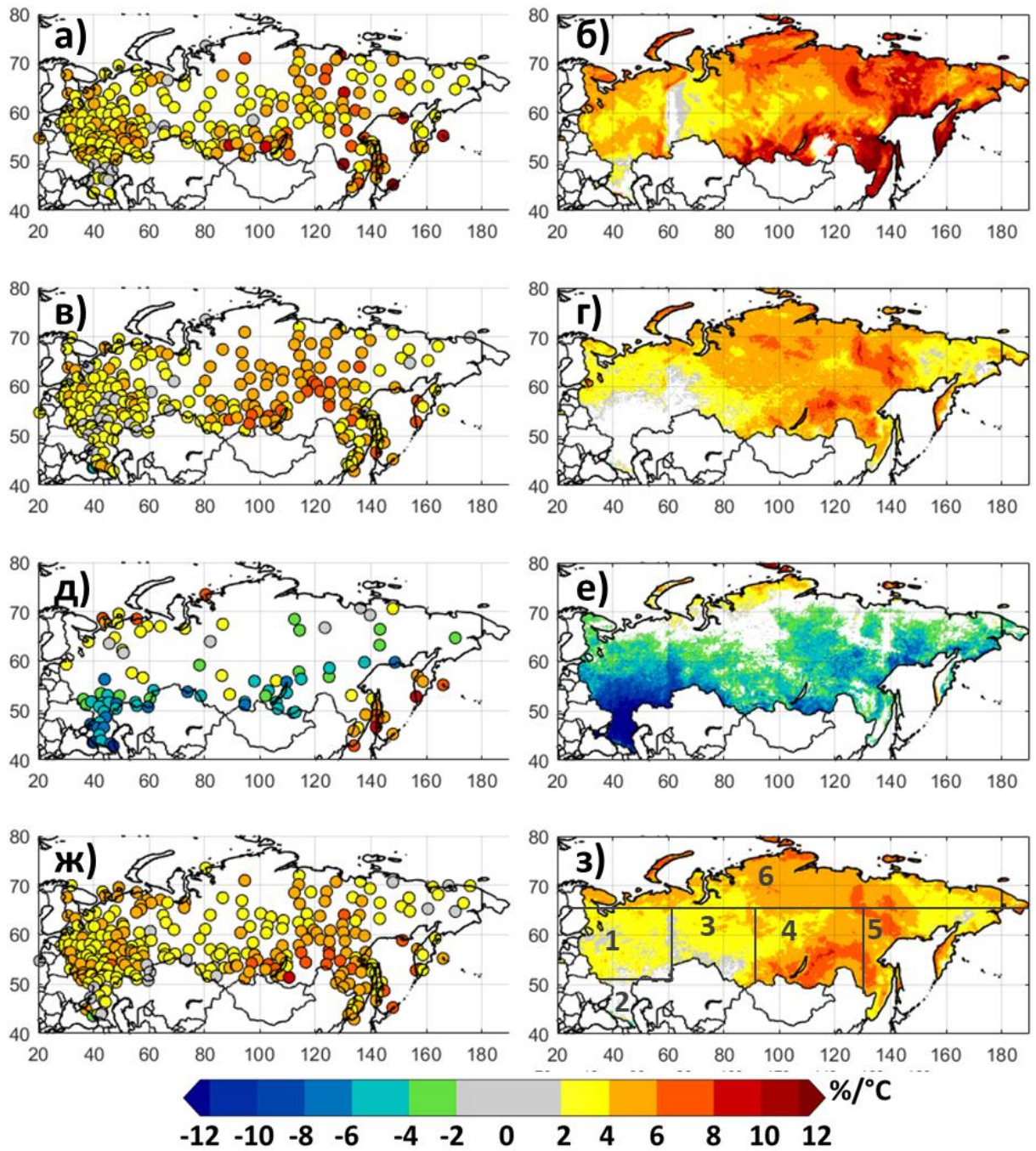


Рисунок 2.2. Коэффициент линейной аппроксимации связи логарифма экстремальных осадков со средней температурой по данным метеорологических станций (а, в, д, ж) и реанализа ERA5 (б, г, е, з) для суточных сумм осадков зимой (а, б), весной (в, г), летом (д, е) и осенью (ж, з). Показаны значения трендов, значимых на уровне 0.05. Серыми линиями (з) показаны границы условных регионов, используемые при региональных оценках: 1 – Европейская территория России (ЕТР), 2 – юг ЕТР, 3 – Западная Сибирь, 4 – Восточная Сибирь, 5 – Дальний Восток, 6 – Российская территория Арктики.

В большинстве регионов России увеличение интенсивности экстремальных осадков при увеличении температуры происходит с меньшими темпами, чем ожидается по соотношению Клаузиуса-Клапейрона ($2-6\%/^{\circ}\text{C}$). Однако, в Приморском крае, на Сахалине и на побережье Камчатки отмечается увеличение осадков, превышающее выбранное соотношение как минимум в два раза. Ранее на основе анализа трендов осадков за последние 40 лет было показано, что на юге Дальнего Востока наблюдаются самые высокие на территории России темпы усиления осадков (основной вклад в увеличение вносят осадки конвективного типа) с откликом на потепление $13,8\%/^{\circ}\text{C}$ [Chernokulsky et al., 2019].

Летом (за исключением северных регионов России) отмечается уменьшение осадков при росте температуры, причем такая тенденция усиливается с севера на юг и достигает значений – $12...14\%/^{\circ}\text{C}$ на юге Европейской территории России. Весной и осенью осадки увеличиваются на $6-8\%$ только на юге Восточной Сибири и на отдельных участках северо-восточной Сибири (восток Республики Саха-Якутия). В остальных регионах наблюдаются меньшие значения, которые не превышают $4\%/^{\circ}\text{C}$ на Европейской территории России и статистически не значимы на юге ЕТР.

Данные реанализа в целом верно отразили основные региональные особенности соотношения Клаузиуса-Клапейрона по сравнению с данными метеостанций для разных сезонов. Летом и весной по данным реанализа значимые зависимости отмечаются в меньшем количестве регионов по сравнению с данными метеорологических станций.

Региональные особенности отклика экстремальных осадков на повышение температуры для разных типов осадков были проведены при помощи выделения шести физико-географических областей (контуры регионов отражены серыми линиями на Рис. 2.2 з). На (Рис. 2.3) показаны зависимости экстремальных осадков (общей суммы, ливневых/конвективных и обложных/крупномасштабных осадков) от температуры для разных регионов России зимой и летом. Для региональных оценок все ряды метеорологических станций и данных реанализа были разделены по массивам, относящимся к выбранным регионам, а затем на основе объединенных данных проводилась процедура определения типа зависимости между осадками и температурой. На графиках показаны сглаженные кривые исследуемых зависимостей.

Зимой (Рис. 2.3 а-е) как по данным метеорологических станций, так и по реанализу, преобладает монотонное увеличение осадков, которое хорошо соответствует отношению

Клаузиуса-Клапейрона на Европейской территории России, в Западной и Восточной Сибири и в Арктике. В Приморском крае и на острове Сахалин, как уже было отмечено ранее, происходит более ускоренное увеличение осадков. Конвективные осадки зимой являются достаточно редким явлением, значимые аппроксимации были получены только для отдельных станций юга России, где происходит преимущественно линейное увеличение осадков. В то же время, даже в зимнее время на отдельных станциях и в регионах может отмечаться значительные расхождения с данными линейной аппроксимации. Так, квадратичная аппроксимация оказалась статистически значимой на трети наблюдательных пунктов (Рис. 2.4 а, б). Также стоит отметить, что интенсивность конвективных осадков по данным реанализа меньше, чем по данным метеорологических станций.

Летом связь интенсивности экстремальных осадков с температурой носит преимущественно нелинейный характер (Рис. 2.3. ж-м, Рис. 2.4), усиление экстремальных осадков при росте температуры продолжается в среднем до 10-15°C (Рис. 2.5), затем это увеличение практически останавливается, а в некоторых случаях начинает уменьшаться. На юге Европейской территории России летом отмечается монотонное уменьшение интенсивности осадков. При этом как по данным метеорологических станций, так и реанализа ERA5, экстремальные ливневые/конвективные осадки летом сильнее при более высоких температурах, чем обложные. Для метеостанций вклад экстремальных ливневых осадков увеличивается при температурах выше 18-20°C, в реанализе – выше 15°C на ЕТР, в Сибири, Арктике, выше 20°C на Дальнем Востоке.

Таким образом, использование линейной аппроксимации связи интенсивности экстремальных осадков и температуры в целом оправдано лишь для зимнего сезона, тогда как для других сезонов очень часто отмечается сильная нелинейная связь между данными характеристиками. Для дальнейшего изучения особенностей режима экстремальных осадков был проведен анализ на лучшее соответствие зависимости температуры и осадков с помощью квадратичной функции как первого приближения нелинейной зависимости (Рис. 2.4). Критерием для такого выбора выступают значения среднеквадратичной ошибки применения линейных и параболических функций.

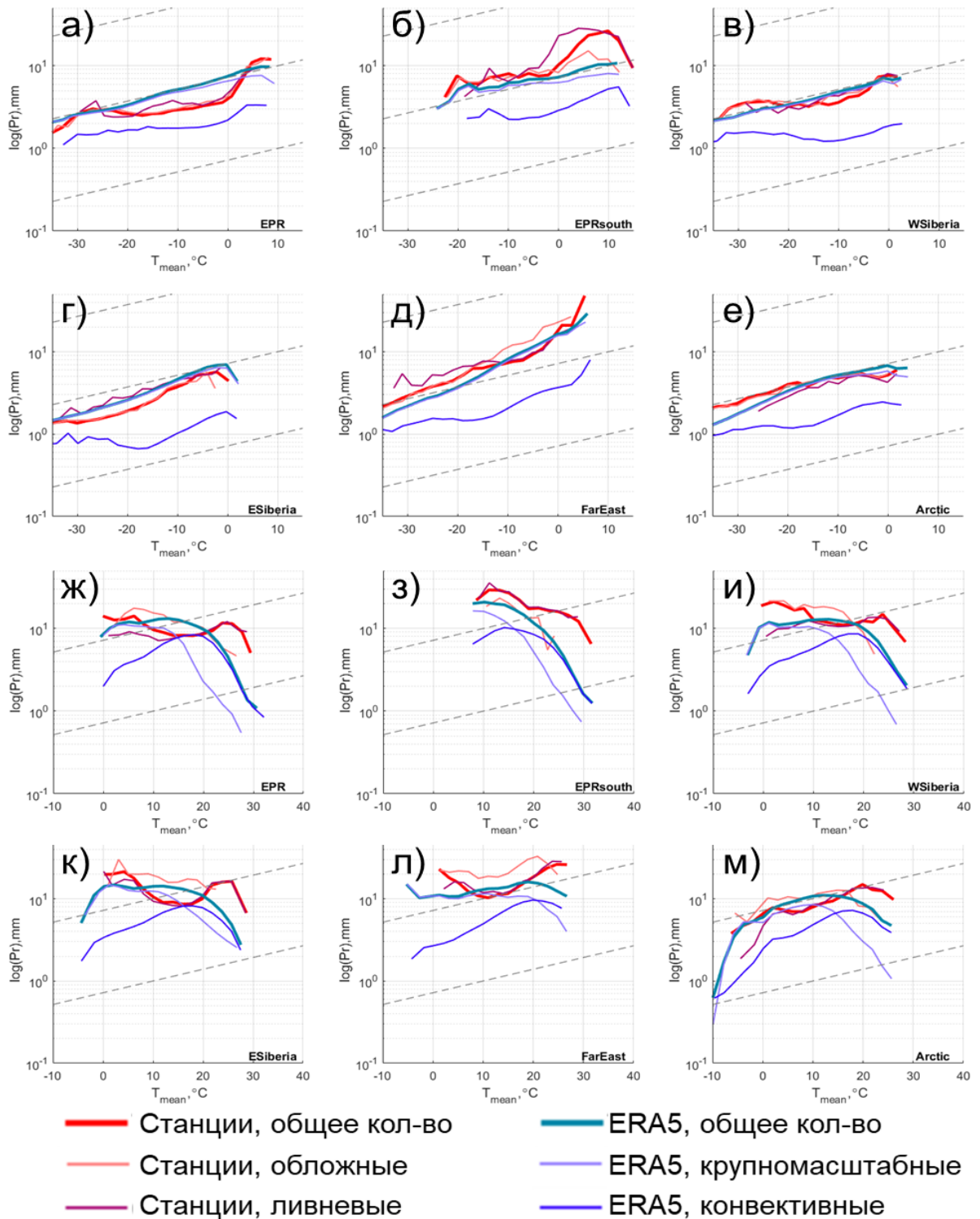


Рисунок 2.3. Значения 95-го перцентиля суточных сумм осадков разных типов в логарифмической шкале как функция средней температуры зимой (а-е) и летом (ж-м) по данным метеорологических станций (красные линии) и реанализа ERA5 (синие линии) для регионов России: Европейской части (а, ж), юга ЕТР (б, з), Западной Сибири (в, и), Восточной Сибири (г, к), Дальнего Востока (д, л) и Арктики (е, м). Пунктирными линиями показаны значения, соответствующие соотношению Клаузиуса - Клапейрона.

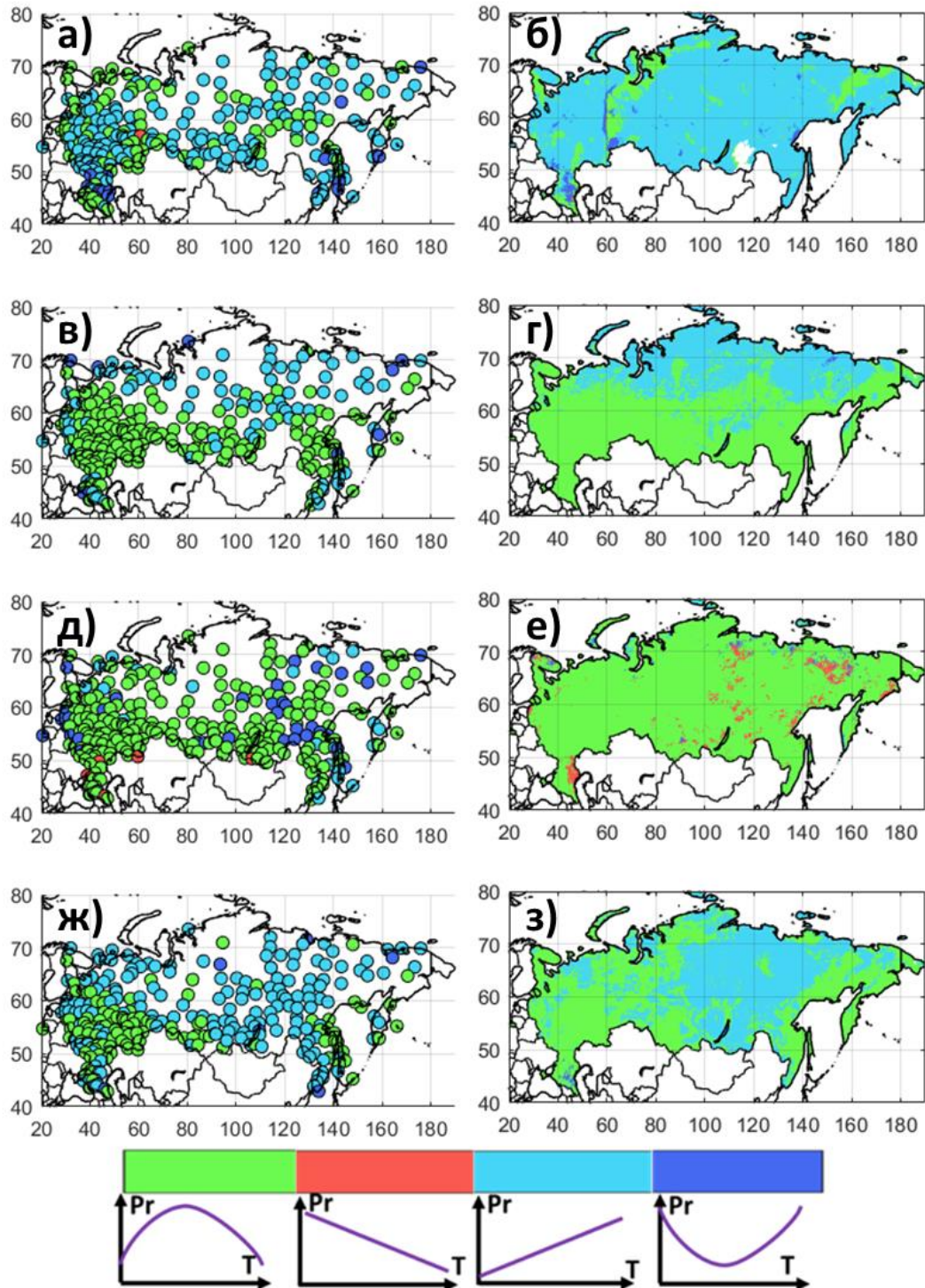


Рисунок 2.4. Типы зависимостей между интенсивностью экстремальных осадков и температурой по данным метеорологических станций (а, в, д, ж) и реанализа ERA5 (б, г, е, з) зимой (а, б), весной (в, г), летом (д, ж) и осенью (ж, з).

Для весны и осени аналогичные расчеты приведены в (Прил. 1). В переходные сезоны на ЕТР и Западной Сибири преимущественно интенсивность экстремальных осадков с ростом температуры уменьшается при температурах выше 10-15°C, для Восточной

Сибири, Дальнего Востока и побережья Арктики более характерным является увеличение интенсивности экстремальных осадков в соответствии с соотношением Клаузиуса-Клапейрона.

Для случаев, когда оправдано применение квадратичной зависимости, на (Рис. 2.5) приведены значения пиковых температур (вершин парабол), выше которых интенсивность экстремальных осадков разных типов начинает уменьшаться.

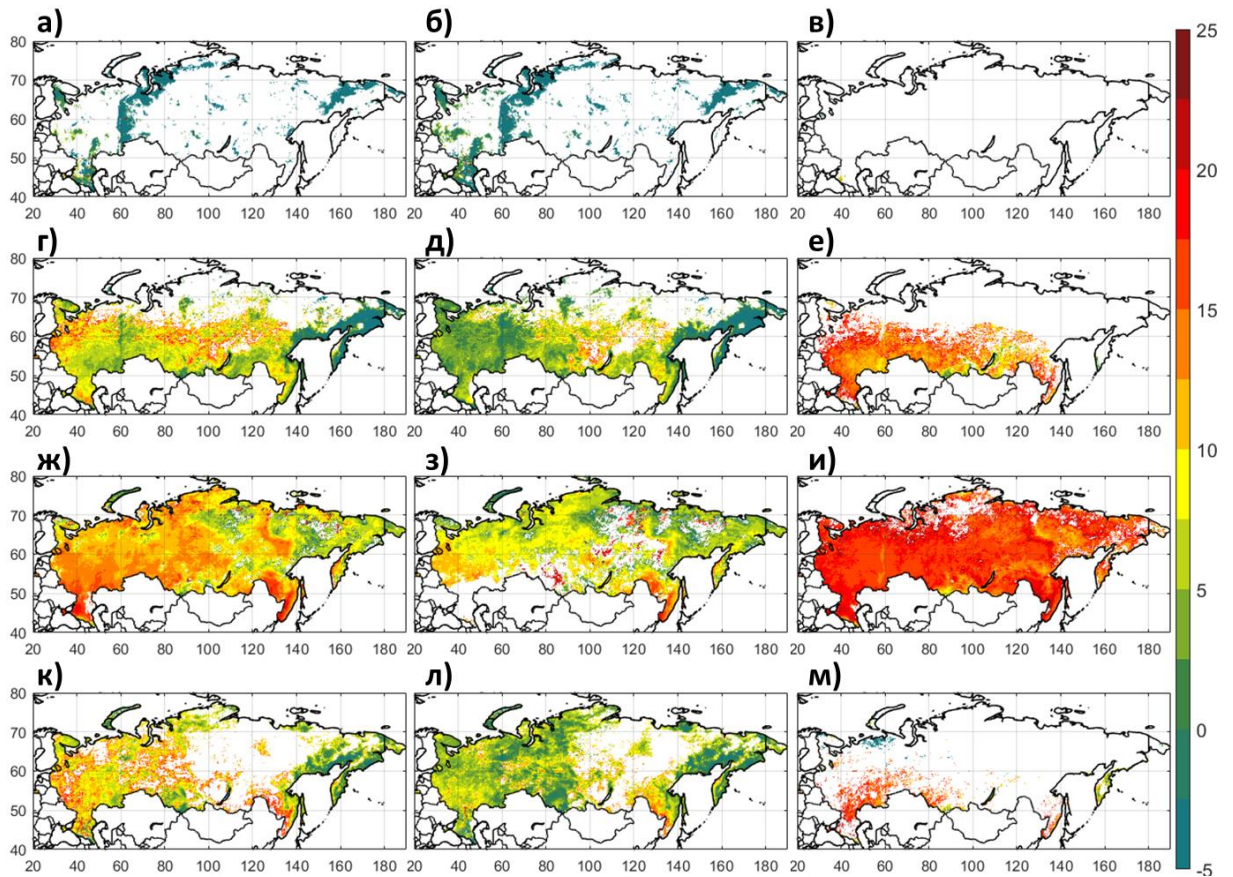


Рисунок 2.5. Значения пиковой температуры, выше которой интенсивность экстремальных осадков уменьшается при использовании квадратичной аппроксимации между интенсивностью экстремальных осадков и температурой по данным реанализа ERA5 для общего количества осадков (а, г, ж, к), крупномасштабных осадков (б, д, з, л) и осадков конвективного типа (в, е, и, м) зимой (а-в), весной (г-е), летом (ж-и) и осенью (к-м).

Зимой для связи температуры и осадков преобладает линейный тип аппроксимации, который, как было показано на (Рис. 2.2), соответствует или немного ниже (4–6%/°C) соотношения Клаузиуса –Клапейрона за исключением побережья Тихого океана. Весной линейное увеличение осадков характерно для северных регионов страны,

осенью – для Азиатской части страны. При этом весной и осенью на Европейской территории России (ЕТР) оптимальной аппроксимацией выступает квадратичная функция (выпуклая вверх парабола). Летом практически повсеместно осадки увеличиваются до некоторого температурного порога, после которого начинается снижение экстремальных осадков. На отдельных станциях отмечается монотонное уменьшение осадков при росте температуры. Для разных типов осадков характерны разные значения температур, при которых интенсивность экстремальных осадков начинает уменьшаться. Например, общее количество осадков летом на ЕТР по данным реанализа ERA5 преимущественно увеличивается до температур 10-15°C, но при этом интенсивность осадков конвективного типа увеличивается до более высоких температур 15-20°C (Рис. 2.5 ж-и), т.е. вклад экстремальных конвективных осадков растет при повышении температуры.

Таким образом, для полученных зависимостей прослеживаются некоторые географические и сезонные особенности. Монотонное увеличение осадков чаще отмечается в более северных регионах, в то время как при смещении к югу (в условия более высоких температур) чаще наблюдается уменьшение интенсивности осадков при росте температуры. Также своими особенностями могут обладать регионы, расположенные близко к источнику влаги (побережье Дальнего Востока) или в условиях недостатка влаги (юг ЕТР).

Общей особенностью данных для всех сезонов является занижение интенсивности осадков (особенно конвективных) в реанализе ERA5 по сравнению с данными метеорологических станций. Вероятно, это может быть связано с различиями в методах разделения осадков по типам в реанализе и по технологии [Chernokulsky et al., 2019], а также с занижением экстремальных осадков в климатических моделях и сеточных архивах данных, где горизонтальное разрешение не всегда позволяет воспроизвести с хорошей точностью процессы образования осадков, в особенности конвективного типа [Volosciuk et al., 2015; Meredith et al 2015b].

В ряде работ [Bao et al., 2017; Ali et al., 2018; Barbero et al., 2018; Traxl et al., 2021] обсуждался вопрос о возможном занижении значений температуры в день выпадения осадков за счет синоптических условий (в первую очередь охлаждающего влияния облачности и нисходящих потоков воздуха по перифериям конвективных ячеек), что могло приводить к уменьшению интенсивности осадков при очень высоких

температурах. Данная особенность может привести к отнесению осадков к диапазонам с более низкими температурами при процедурах аппроксимации. Для проверки этого утверждения были проанализированы эмпирические функции распределения вероятностей для разностей значений температуры в день с экстремальными осадками и температурой за день до осадков (Рис. 2.6).

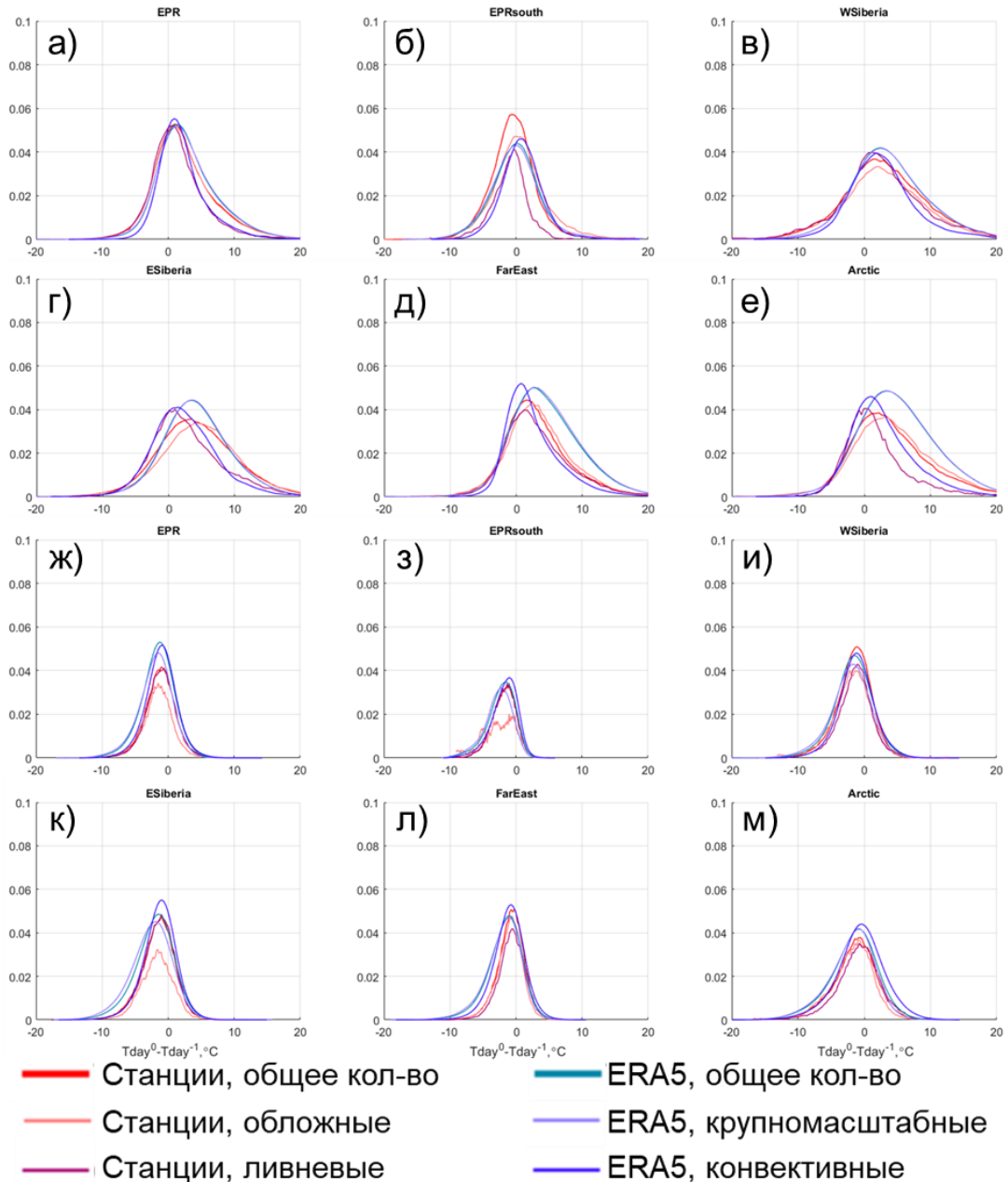


Рисунок 2.6. Эмпирические функции распределения разностей температур (температура за день до осадков минус температура в день с осадками) для разных типов осадков зимой (а-е) и летом (ж-м) по данным метеорологических станций (красные линии) и реанализа ERA5 (синие линии) для регионов России: ЕТР (а, ж), юга ЕТР (б, з), Западной Сибири (в, и), Восточной Сибири (г, к), Дальнего Востока (д, л) и Арктики (е, м).

Для зимнего сезона (Рис. 2.6 а-е) в большинстве регионов при выпадении осадков чаще происходит повышение температуры в среднем на 2-3°C по сравнению с предыдущими сутками (коэффициент асимметрии функций распределения больше нуля), что свидетельствует о повышении вероятности более сильных осадков при повышении температуры (например, при прохождении теплых атмосферных фронтов).

Летом, наоборот, отмечается небольшая асимметрия в сторону понижения температур при экстремальных осадках на 1-1.5°C (Рис. 2.6 ж-м). Однако, на долю понижения температуры зимой и повышения летом также приходится значительное число случаев выпадения экстремальных осадков. Таким образом, локальный охлаждающий эффект при выпадении осадков не может объяснить полностью полученное уменьшение интенсивности осадков при высоких температурах. Также в [Barbero et al., 2018] отмечается, что использование температуры точки росы, как, например, в [Bao et al., 2017; Ali et al., 2018; Tian et al., 2023], показывает важность учета характеристик влажности в исследуемом регионе.

2.3. Фактор относительной влажности в формировании связи интенсивности экстремальных осадков с температурой

Одной из гипотез, объясняющей наблюдаемое уменьшение осадков при температурах выше 15-20°C в разных регионах России летом, может являться влияние изменения относительной влажности как индикатора наличия влаги и, отчасти, статической устойчивости атмосферы. Для проверки этого утверждения были построены зависимости относительной влажности от температуры для случаев выпадения сильных осадков (больше 95%-го перцентиля) по данным метеорологических станций (Рис. 2.7) и реанализа ERA5 (Рис. 2.8).

Зимой значения относительной влажности в приповерхностном слое воздуха находились в диапазоне 70-80% при низких температурах (ниже -20°C) и постепенно увеличивались при росте температуры, достигая 90% при температурах около 0°C. Такое распределение значений получено для всех регионов России кроме юга ЕТР, где при отрицательных температурах относительная влажность также увеличивается при росте температуры, выпадение самых сильных осадков фиксировалось при температурах температуры относительная влажность уменьшалась, повторяя поведение осадков

в этом регионе. Летом, не смотря на значительную изменчивость относительной влажности, общей особенностью здесь является снижение значений относительной влажности при температурах выше 15-20°C, которое сопровождается снижением экстремальных осадков.

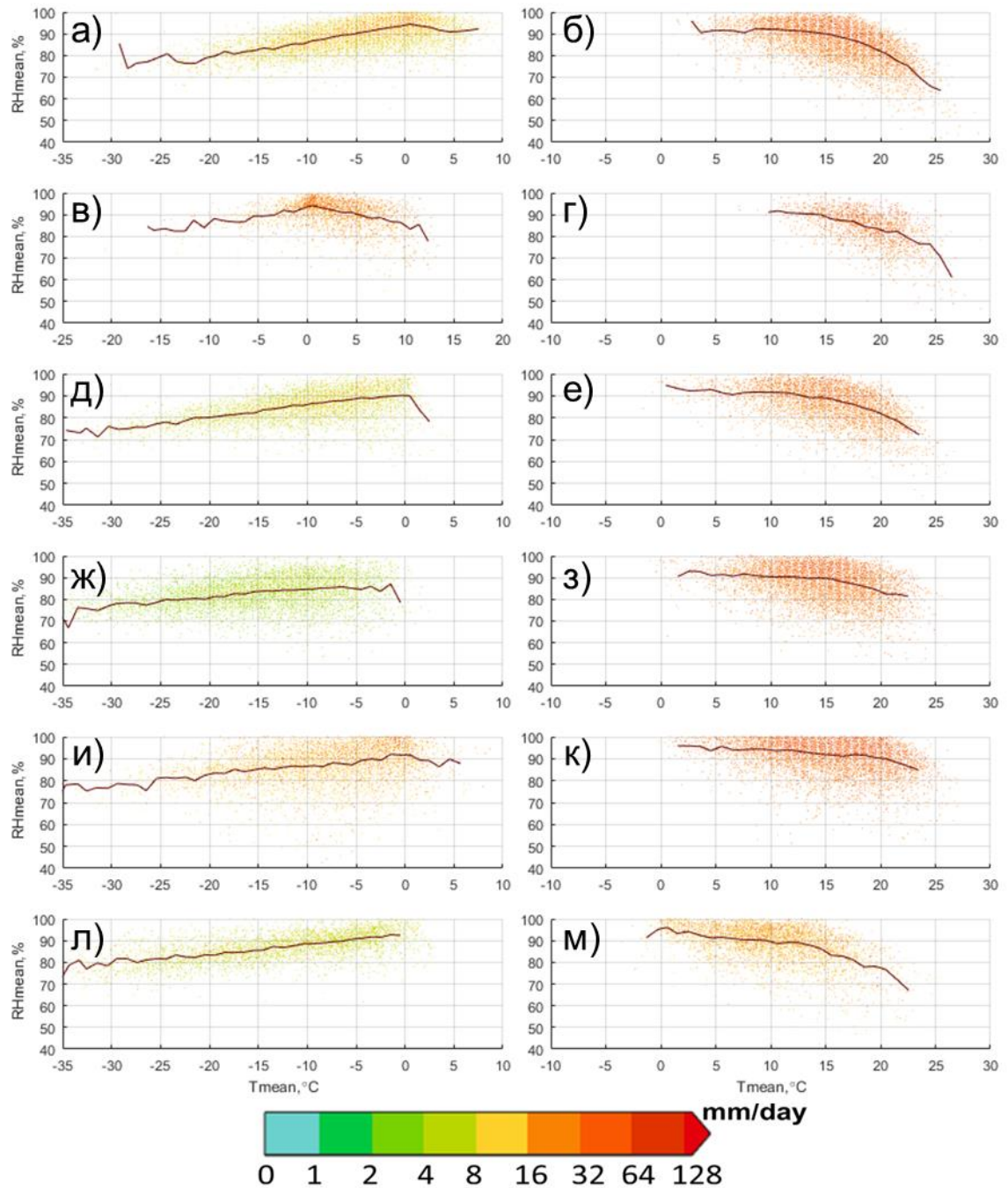


Рисунок 2.7. Зависимость относительной влажности (ось X) от температуры (ось Y) в день выпадения экстремальных осадков (общее количество, интенсивность осадков показана цветом) зимой (справа) и летом (слева) по данным метеорологических станций для регионов России: Европейской части (а, б), юга ЕТР (в, г), Западной Сибири (д, е), Восточной Сибири (ж, з), Дальнего Востока (и, к) и Арктики (л, м). Сплошными линиями показаны скользящие средние исследуемых соотношений.

Данные реанализа ERA5 дают в целом аналогичные результаты (Рис. 2.8). Более широкий диапазон значений относительной влажности (за счет большего размера выборки сеточных архивов по сравнению с точечными метеостанциями) позволяет отчетливее заметить стабилизацию или даже понижение (на юге ЕТР) значений относительной влажности при положительных температурах зимой. По сравнению с данными метеорологических станций, зимой в реанализе сильнее выражено преобладание самых сильных осадков при более высоких значениях температуры и относительной влажности, особенно для Дальнего Востока и ЕТР. Летом максимальные осадки также в основном были приурочены к значениям относительной влажности 100%, но температуры при этом находились преимущественно в диапазоне 15-20°C (для Арктического региона 10-15°C), дальнейшее увеличение температуры приводило к ослаблению экстремальных осадков. Аналогичные расчеты были проведены для обложных/крупномасштабных и ливневых/конвективных осадков (Прил. 2, 3, 4, 5). Показано, что летом снижение относительной влажности при росте температуры сильнее выражено для случаев выпадения ливневых/конвективных осадков.

Вполне вероятно, что наблюдаемое снижение относительной влажности летом может объяснять хотя бы часть случаев уменьшения экстремальных осадков при высоких температурах. Стоит также отметить, что значение температуры, при котором происходит уменьшение относительной влажности достаточно хорошо совпадает со значениями вершины параболы при квадратичной аппроксимации интенсивности экстремальных осадков (Рис.2.3, 2.5). Полученный результат указывает, что при высоких температурах (которые могут быть результатом различных динамических факторов) локальный дефицит влаги может выступать важным фактором, лимитирующим теоретически возможное усиление интенсивности осадков в условиях глобального потепления согласно соотношению Клаузиуса-Клапейрона. Это подтверждает важность наличия дополнительных источников влаги при осадкообразовании при более высоких температурах.

Помимо изучения связи с относительной влажностью, существуют и другие возможные методы оценки фактора наличия влаги, например, с использованием данных по абсолютной влажности или температуре точки росы [Lenderink et al., 2018; Huang et al., 2019; Fowler et al., 2021]. Вопрос выбора различных характеристик

влажности при изучении особенностей режима экстремальных осадков заслуживает дальнейшего подробного изучения.

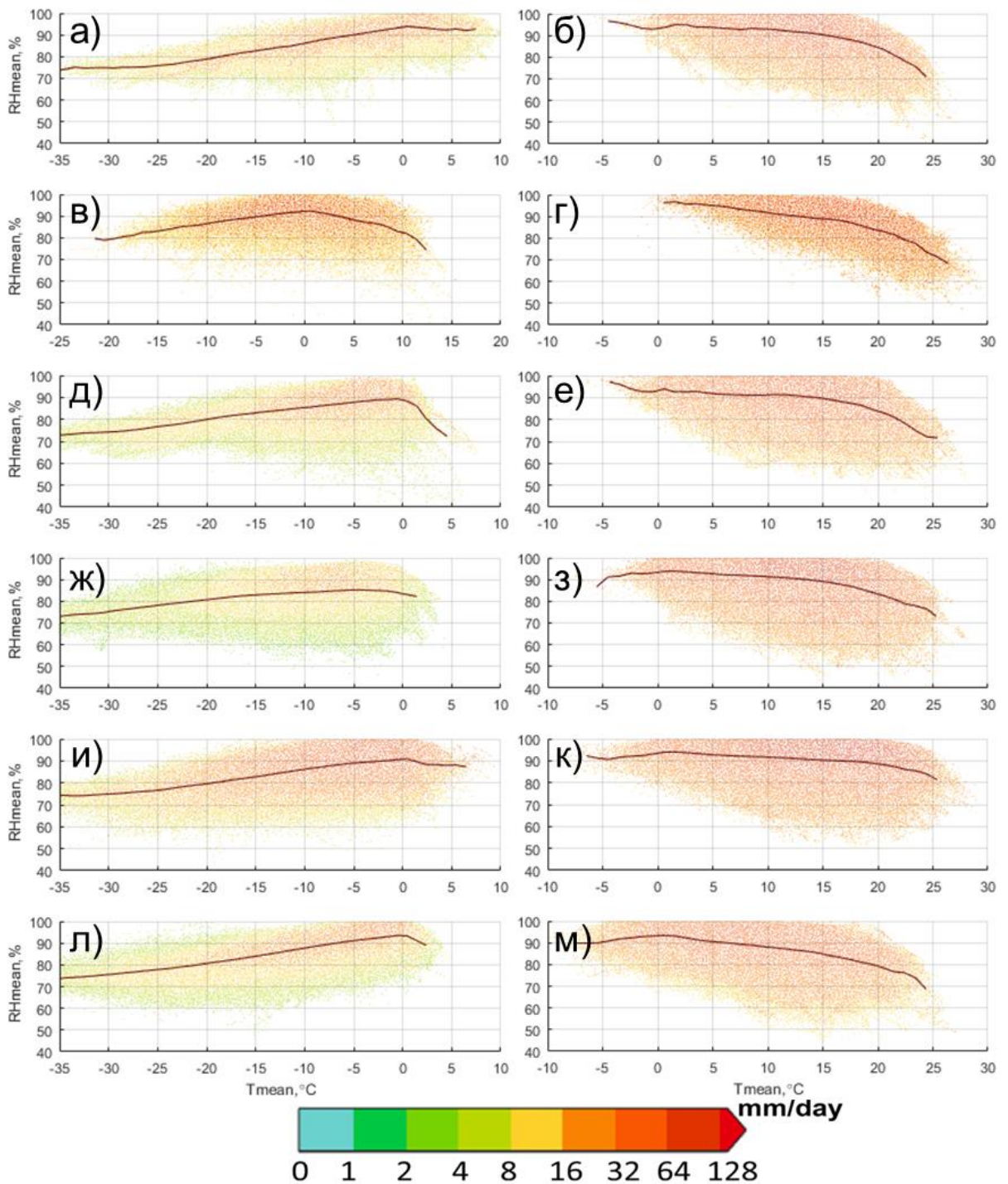


Рисунок 2.8. Зависимость относительной влажности (ось X) от температуры (ось Y) в день выпадения экстремальных осадков (общее количество, интенсивность осадков показана цветом) зимой (справа) и летом (слева) по данным реанализа ERA5 для регионов России: Европейской части (а, б), юга ЕТР (в, г), Западной Сибири (д, е), Восточной Сибири (ж, з), Дальнего Востока (и, к) и Арктики (л, м). Сплошными линиями показаны скользящие средние исследуемых соотношений.

Экстремальные осадки и связанные с ними опасные погодные и климатические явления происходят на территории России достаточно часто [Meredith et al., 2015; Мохов, Семенов, 2016; Zolotokrylin and Cherenkova, 2017]. Как было отмечено ранее, понимание механизмов возникновения сильных осадков необходимо для составления более точных климатических и метеорологических прогнозов, которые помогут уменьшить потенциальные экономические и социальные последствия от таких явлений в ося климата [Sillmann et al., 2017; Masson-Delmotte et al., 2021].

В данной главе на основе данных метеорологических станций и реанализа ERA5 проведен анализ зависимости интенсивности экстремальных осадков (общего количества, а также осадков обложного и ливневого типов) от температуры для территории России за последние 40-50 лет с применением технологии, описанной в [Hardwick Jones et al., 2010; Drobinski et al., 2016; Wang et al., 2017a; Wang et al., 2018].

Согласно результатам исследований в разных регионах мира, в большинстве случаев интенсивность экстремальных осадков монотонно увеличивается при увеличении температуры в высоких широтах и в тропиках, при этом в средних широтах экстремальные осадки часто увеличиваются лишь при низких температурах, а при превышении некоторого температурного значения интенсивности экстремальных осадков могут стабилизироваться или даже уменьшаться при дальнейшем увеличении температуры [Utsumi et al., 2011; Ali et al., 2018]. Анализ данных для территории России подтвердил эти выводы и показал, что характер связи интенсивности экстремальных осадков и температуры может значительно отличаться от теоретических оценок по соотношению Клаузиуса-Клапейрона, полученные аппроксимации имеют как сезонные и региональные особенности, так и отличия в зависимости от типа наблюдаемых осадков.

Данные реанализа ERA5 достаточно хорошо воспроизводят основные региональные и сезонные особенности соотношения между интенсивностью экстремальных осадков и температуры ($\log(p95)-T_m$), полученные по данным метеорологических станций. Например, реанализ ERA5 показывает значительное уменьшение интенсивности экстремальных осадков в южных регионах страны летом. При этом стоит отметить, что данные реанализа преимущественно занижают значения экстремальных осадков (в особенности конвективного типа) для всех сезонов. В первую очередь это связано с представлением данных по осадкам в сеточном формате с помощью процедур переинтерполяции данных наблюдений в атмосферных моделях [Volosciuk et al., 2015].

Кроме того, при создании данных реанализа и при анализе данных метеорологических станций применялись различные технологии разделения осадков на типы, что также может влиять на различия в оценках вклада конвективных осадков [Chernokulsky et al., 2019].

Для зимнего сезона увеличение согласно соотношению Клаузиуса - Клапейрона на $6 - 8\%/^{\circ}\text{C}$ зафиксировано лишь для отдельных регионов страны. В большинстве случаев отмечено увеличение интенсивности осадков при росте температуры с более низкими темпами $2 - 6\%/^{\circ}\text{C}$. На территории России в холодное время года преобладают обложные/крупномасштабные осадки, связанные в большей мере с потоками влаги из Атлантики, Арктики и Тихого океана. При продвижении этих масс на холодный материк, где при низких температурах давление насыщения водяного пара относительно невелико (т. е. для насыщения воздуха достаточно небольшого количества водяного пара), влага конденсируется, образуются облака и затяжные осадки. В таких условиях можно ожидать выполнение соотношения Клаузиуса-Клапейрона с достаточно высокой точностью, что и отмечается по данным наблюдений и реанализа. В то же время, на Дальнем Востоке и в южной части Восточной Сибири зимой отмечается двукратное превышение соотношения Клаузиуса-Клапейрона ($10 - 14\%/^{\circ}\text{C}$), что может косвенно говорить об увеличении испарения и переноса влаги с океана на материк при повышении температуры в данном регионе. Действительно, интенсивное испарение, усиление восходящих движений воздуха, приводящее к усилению конвергенции влаги и образованию конвективной облачности, рассматривалось в качестве возможных причин двукратного превышения теоретических оценок [Haerter and Berg, 2009; Lenderink et al., 2017]. Изменение динамических факторов, таких как смещение штормтреков циклонов к полюсам [Seidel et al., 2008; Grise and Davis, 2020], сильнее выраженное зимой, может быть причиной уменьшения крупномасштабных осадков в южных регионах Северной Евразии и увеличения в центральных и северных регионах. Также изменения в характере циркуляции и, вследствие этого, показателей переноса влаги, были отмечены в качестве основной причины усиления экстремальных осадков в зимнее время над Южным Китаем [Huang et al., 2018].

Для летнего сезона в большинстве регионов страны связь интенсивности экстремальных осадков и температуры имеет нелинейный характер, при низких температурах происходит усиление осадков, но после превышения температурного

диапазона 15-20°C интенсивность экстремальных осадков часто стабилизируется или начинает уменьшаться, что ярче всего выражено на юге ЕТР. Анализ данных об относительной влажности у поверхности показал, что уменьшение интенсивности экстремальных осадков при высоких температурах сопровождается снижением относительной влажности. Схожие результаты были получены в работах [Hardwick Jones et al., 2010; Gao et al., 2020]. По всей видимости, при высоких температурах меняется вклад разных факторов на процессы осадкообразования. В теплое время года насыщенный влагой морской воздух так же, как и зимой, приходит на континент, но температуры над сушей летом обычно выше, по мере трансформации воздушной массы морской воздух иссушается и уходит от состояния насыщения. Летом в условиях более высоких температур требуется большее количество водяного пара в воздухе для достижения состояния насыщения.

Данный процесс может объяснить устойчивое снижение значений относительной влажности при тех же значениях температуры воздуха (15-20°C), при которых летом увеличение осадков начинает сменяться их уменьшением. Вероятно, для образования сильных осадков при таких условиях важным фактором начинает выступать доступность дополнительных источников влаги, которая может определяться, например, крупномасштабными динамическими изменениями (расширение границ крупномасштабных ячеек циркуляции к северу [Seidel et al., 2008], динамика муссонов [Pfahl et al., 2017]) и региональными особенностями циркуляции атмосферы (горные циркуляции и влияние орографии [Drobinski et al., 2016]), эффектами городского острова тепла, особенностями землепользования. Кроме того, наличие местных источников влаги (крупных озер, водохранилищ, болот) и концентрации аэрозолей как ядер конденсации могут быть дополнительным источником испарения, скрытого потока тепла и ресурсом для конденсации и образования облаков [Yarinich et al., 2019; Wang et al., 2022].

Стоит также отметить, что летом на большей части территории России преобладают ливневые/конвективные осадки (за исключением Арктического побережья) [Чернокульский и др., 2018]. Уменьшение интенсивности экстремальных ливневых осадков даже в условиях неограниченного доступа дополнительных источников влаги может быть связано с возникновением нисходящих токов воздуха по периферии мощных кучевых облаков и мезомасштабных конвективных комплексов, что ведет к ослаблению

процессов конвекции и дальнейшему усилению осадков [Drobinski et al., 2016; Meredith et al., 2015].

Данные выводы хорошо соотносятся с результатами в [Berg et al., 2009], где для территории Европы в среднем зимой экстремальные осадки усиливаются (особенно на северо-востоке региона), а летом ослабевают, так как в теплое время года определяющим фактором выступает доступность местных источников влаги.

Различия в характере связи между интенсивностью экстремальных осадков и температурой в разные сезоны года может указывать на то, что вклад различных динамических и термодинамических факторов может изменяться при разных температурных условиях и подчеркивает нелинейный отклик осадков на повышение температуры. Таким образом, представленные здесь результаты подчеркивают многогранность факторов, влияющих на образование экстремальных осадков на территории России. Приведенное исследование может выступать в качестве дополнительного источника информации об особенностях режима экстремальных осадков разных типов на территории России в условиях глобального потепления.

Глава 3. Изменение характеристик температуры и осадков в XX-XXI вв. по данным наблюдений и моделей климата CMIP6

Проведено исследование изменений индексов экстремальных температур и осадков по данным климатическим моделям CMIP6 на территории России в XX и XXI столетиях с использованием климатических моделей проекта CMIP6. В современный период данные моделей сопоставляются с данными метеорологических станций, реанализа ERA5 и архива CRU TS 4.06. Для современного периода 1991-2020 гг. по эмпирическим данным зимой на территории России получено увеличение сезонных сумм осадков на побережье Дальнего Востока и в Поволжье. В центральной части Европейской территории России (ЕТР) также отмечено увеличение повторяемости дней с экстремальными осадками, сопровождающееся уменьшением общей частоты выпадения осадков. Весной наибольшие темпы повышения сумм осадков отмечены для юга Западной и Восточной Сибири, северо-восточной Сибири и Приморского края, на юге Сибири отмечено небольшое увеличение повторяемости экстремальных осадков, сопровождающееся увеличением общей суммы осадков и их повторяемости. Летом уменьшение сумм осадков и повторяемости дней с осадками отчетливо выражено на юге Восточной Сибири и юге ЕТР. Осенью на станциях преобладает статистически незначимое уменьшение осадков, которое сопровождается уменьшением общей повторяемости дней с осадками.

Модели климата в среднем для ансамбля показывают рост относительных сумм осадков и повторяемости экстремальных осадков на большей части территории России в зимний период, сильнее выраженный для сценария SSP585, причем данные тенденции могут усилиться в ближайшие десятилетия. Летом, напротив, для юга ЕТР в целом отмечается слабое уменьшение сезонных сумм осадков и количества дней с осадками. Однако, сильные межмодельные различия, особенно в летний сезон, не позволяют сделать однозначных выводов по поводу изменений характеристик осадков на территории России в ближайшие десятилетия, лишь к концу XXI столетия изменения становятся более выраженными. Например, на ЕТР и на севере Сибири может произойти заметное увеличение зимних сумм осадков и повторяемости экстремальных осадков. Летом на ЕТР к концу XXI столетия возможно небольшое уменьшение сумм осадков и количества дней с осадками.

3.1. Данные и методы

В главе представлен обзор изменений характеристик среднего режима, а также индексов экстремальных температур и осадков по данным наблюдений на метеорологических станциях и климатических моделей CMIP6 на территории России в XX и XXI столетиях.

В работе анализируются данные тридцати четырех моделей общей циркуляции атмосферы и океана, которые входят в международный проект сравнения моделей климата CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) [Eyring et al., 2016]. Всего в проекте участвует более 60 моделей (среди которых содержатся в том числе разные версии одних и тех же модельных систем), предоставляющих для анализа различные по полноте наборы данных. Выбор 34 моделей обоснован наличием данных по суточным значениям температуры и осадков в открытых источниках данных для экспериментов historical (1850-2014 гг.), SSP245 и SSP585 (2015-2100 гг.). Данные были получены из источника Global Center for Environmental Data Analysis [<https://data.ceda.ac.uk/badc/cmip6/data/CMIP6>]. Шаг сетки в выбранных моделях в среднем варьируется от 0.7—1.5° (модели CNRM-CM6-1-HR, EC-Earth3, MPI-ESM1-2-HR и др.) до 2—2.8° (CanESM5, INM-CM4-8, IPSL-CM6A-LR, MIROC-ES2L). Список использованных моделей и их пространственное разрешение приведен в (Табл. 3.1).

Использовались данные численных экспериментов для исторического периода (historical, 1900 – 2014 гг.) и для двух сценариев антропогенного воздействия SSP245 и SSP585 (2015-2100 гг.) [Van Vuuren et al., 2014]. Сценарий SSP245 подразумевает удержание эмиссий парниковых газов примерно на современном уровне до середины века и последующее их снижение, в результате чего внешнее радиационное воздействие достигает максимума в 4.5 Вт/м² к 2080-м гг. Сценарий SSP585 описывает будущее развитие общества и экономики без сдерживания роста эмиссий парниковых газов, которое по экономическим оценкам может привести практически к удвоению эмиссий парниковых газов к середине XXI в. и монотонному росту антропогенного радиационного воздействия с современных значений в 2.5 Вт/м² до 8.5 Вт/м² к концу века. Это самый агрессивный по интенсивности сценарий из всех, которые используются в экспериментах с моделями CMIP6, дающий верхнюю оценку возможных изменений климата вследствие антропогенного воздействия.

Таблица 3.1. Модели CMIP6 и их основные характеристики.

№ п/п	Модели	Страна	Номер ансамбля	Шаг по долготе, °	Шаг по широте, °
1	ACCESS-CM2	Австралия	rlilplf1	1.875	1.25
2	ACCESS-ESM1-5	Австралия	rlilplf1	1.875	1.25
3	BCC-CSM2-MR	Китай	rlilplf1	1.125	1.121
4	CAMS-CSM1-0	Китай	r2ilplf1	1.125	1.121
5	CanESM5	Канада	rlilplf1	2.813	2.791
6	CESM2	США	r4ilplf1	1.25	0.942
7	CESM2-WACCM	США	rlilplf1	1.25	0.942
8	CMCC-CM2-SR5	Италия	rlilplf1	1.25	0.942
9	CMCC-ESM2	Италия	rlilplf1	1.25	0.942
10	CNRM-CM6-1	Франция	rlilplf2	1.406	1.401
11	CNRM-ESM2-1	Франция	rlilplf2	1.406	1.401
12	EC-Earth3	Европа	rlilplf1	0.703	0.702
13	EC-Earth3-CC	Европа	rlilplf1	0.703	0.702
14	EC-Earth3-Veg	Европа	rlilplf1	0.703	0.702
15	FGOALS-g3	Китай	rlilplf1	2	2.025
16	GFDL-CM4	США	rlilplf1	1.25	1
17	GFDL-ESM4	США	rlilplf1	1.25	1
18	HadGEM3-GC31-LL	Великобритания	rlilplf3	1.875	1.25
19	ITM-ESM	Индия	rlilplf1	1.875	1.905
20	INM-CM4-8	Россия	rlilplf1	2	1.5
21	INM-CM5-0	Россия	rlilplf1	2	1.5
22	IPSL-CM6A-LR	Франция	rlilplf1	2.5	1.268
23	KACE-1-0-G	Южная Корея	rlilplf1	1.875	1.25
24	KIOST-ESM	Южная Корея	rlilplf1	1.875	1.875
25	MIROC6	Япония	rlilplf1	1.406	1.401
26	MIROC-ES2L	Япония	rlilplf2	2.813	2.791
27	MPI-ESM1-2-HR	Германия	rlilplf1	0.938	0.935
28	MPI-ESM1-2-LR	Германия	rlilplf1	1.875	1.865
29	MRI-ESM2-0	Япония	rlilplf1	1.125	1.121
30	NESM3	Китай	rlilplf1	1.875	1.865
31	NorESM2-LM	Норвегия	rlilplf1	2.5	1.895
32	NorESM2-MM	Норвегия	rlilplf1	1.25	0.942
33	TaiESM1	Тайвань	rlilplf1	1.25	0.942
34	UKESM1-0-LL	Великобритания	rlilplf2	1.875	1.25

Проведен анализ изменений как среднесезонных значений температур и осадков на территории России, так и их экстремальных характеристик для периода 1900-2100 гг. Для каждой модели вычислены значения средних сезонных температур и повторяемости (числа дней в сезон) экстремально низких и экстремально высоких значений температуры. В качестве пороговых значений экстремально низкой температуры использовался 5%-й процентиль, а для экстремально высоких — 95%-й процентиль

эмпирической функции распределения вероятностей для периода 1981—2010 гг. Для режима осадков получены значения средних сезонных сумм осадков, интенсивности осадков (средних за сезон осадков в дни с осадками, превышающими 0.1 мм/день), повторяемости дней с осадками (≥ 0.1 мм/день), повторяемости дней с экстремальными осадками и вклада экстремальных осадков в общую сумму. Экстремальными осадками считались суточные суммы осадков, превышающие 95%-й процентиль функции распределения для периода 1981—2010 гг.

С целью вычисления средних оценок по ансамблю климатических моделей для всех полученных характеристик и индексов была проведена процедура билинейной интерполяции на единую сетку $1 \times 1^\circ$. Аналогичный подход применялся, например, в работе [Kim et al., 2020] при изучении характеристик экстремальных температур и осадков. Средние по ансамблю моделей значения считаются более надежной оценкой современных и будущих изменений климата, связанных с внешним воздействием, поскольку процедура осреднения может уменьшить случайно-распределенные ошибки индивидуальных моделей [Gleckler et al., 2008; Pierce et al., 2009]. Следует отметить, что такой подход, будучи самым распространенным, не всегда является оптимальным, для анализа мульти-модельных результатов могут применяться и более сложные статистические модели [Елисеев, Семенов, 2016; Christiansen, 2020].

В качестве эмпирических значений для сравнения с модельными результатами использовались данные наблюдений по среднесуточным температурам воздуха на 2 метрах и суточным суммам атмосферных осадков на 524 метеорологических станциях климатического архива ВНИИГМИ МЦД [meteo.ru] за период 1966-2017 гг. Также были проанализированы данные реанализа ERA5 с горизонтальным разрешением $0.25 \times 0.25^\circ$ за период 1979—2021 гг [Hersbach et al., 2018]. Для оценки более продолжительных наблюдавшихся изменений среднего режима температуры и осадков использовались среднемесячные данные CRU TS4.06 за период 1901—2021 гг., полученные с помощью интерполяции данных станционных наблюдений на широтно - долготную сетку $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ [Harris et al., 2020].

В качестве количественной характеристики климатических изменений используется коэффициент линейного тренда. Проводились оценки статистической значимости трендов с использованием F-критерия Фишера с уровнем значимости 0.05. Для установления, насколько точно модельные данные отражают реальную картину

климатических изменений, было проведено сравнение трендов модельных исторических данных CMIP6 с данными метеорологических наблюдений. Вероятные изменения исследуемых характеристик в XXI в. проанализированы на основе экспериментов со сценариями эмиссий SSP245 и SSP585. Расчеты изменений характеристик температуры и осадков не дают представления о величине межмодельного разброса значений полученных индексов. Для оценки межмодельного разброса полученных тенденций в работе также приведены карты количества климатических моделей, показывающих тренды одного знака.

3.2. Изменения характеристик температуры на территории России в XX-XXI вв. по данным наблюдений и ансамбля моделей CMIP6

Согласно данным метеорологических станций и реанализа ERA5 на территории России последние 40 лет происходит практически повсеместное повышение температуры (Рис. 3.1).

Зимой наибольшие темпы повышения температуры отмечаются на станциях Арктического побережья и превышают $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$. Также зимой выделяются области с отрицательными трендами на юге Западной Сибири с минимумом в Алтайском регионе, а также в центральной части Республики Саха-Якутия (до $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$), однако полученные отрицательные тенденции преимущественно статистически не значимы. Весной наиболее активное повышение температуры отмечается на юге Европейской территории России и в Сибири севернее параллели 60°с.ш. Летом температуры увеличиваются в Восточной Сибири и на Европейской территории России с максимальными значениями в южных регионах. Осенью статистически значимое увеличение температуры со скоростями $0.8-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ отмечены повсеместно на Восточно-Европейской равнине, а также на северо-востоке Сибири.

Все перечисленные особенности хорошо соотносятся с полями коэффициентов линейных трендов, полученных по реанализу ERA5. Однако, осенью по данным реанализа происходит занижение значений трендов температуры на Европейской территории России, а также область отрицательных трендов зимой на юге Западной Сибири выражена значительно слабее.

Результаты расчета трендов температуры по данным климатических моделей CMIP6 (Рис. 3.2) в среднем показывают более равномерное повышение температуры по всей

территории страны в 1991-2020 гг., чем по данным метеорологических станций и реанализа ERA5 (Рис. 3.2. а, г, ж, к).

Над сушей повышение температуры за последние 30 лет в современный период в среднем по моделям составило $0.4-0.6^{\circ}\text{C}/10$ лет весной и летом, $0.8-1^{\circ}\text{C}/10$ лет зимой и осенью (с максимальными значениями на побережье Арктики). Однако, понижение температуры зимой на юге Сибири, полученное по данным метеорологических станций и реанализа, в среднемодельных оценках не отражено.

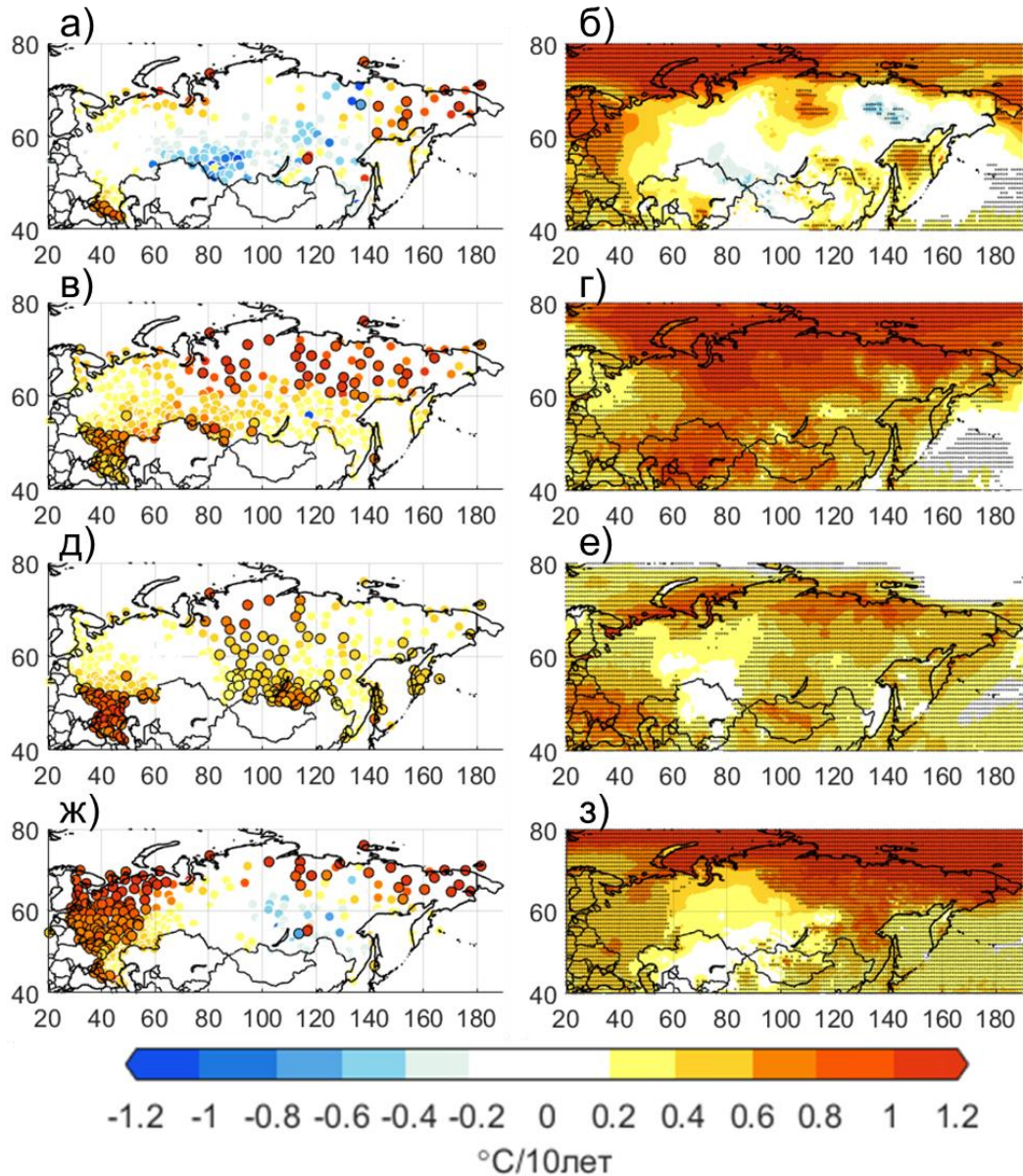


Рисунок 3.1. Коэффициенты линейного тренда температуры воздуха на 2 м (в $^{\circ}\text{C}/10$ лет) по метеорологическим станциям (а, в, д, ж) и реанализу ERA5 (б, г, е, з) в 1991-2020 гг. для зимы (а, б), весны (в, г), лета (д, е) и осени (ж, з). Статистически значимые на уровне 0.05 тренды показаны черными контурами для станций и штриховкой для реанализа.

По данным климатических сценариев во второй половине XXI столетия рост температуры может продолжиться, но темпы повышения температуры по умеренному сценарию SSP245 над сушей ниже, чем в современный период и составляют в среднем по моделям 0.2-0.4°C/10 лет для ЕТР и Восточной Сибири и до 0.6°C/10 лет на Урале и в Западной Сибири. Для более жесткого сценария SSP585 в 2051-2080 гг. повышение температуры весной и летом может составить 0.8-1°C/10 лет, а для зимнего сезона практически на всей территории России (кроме юга ЕТР) могут превысить 1-1.2°C/10 лет.

Значительное увеличение среднесезонных температур также сопровождается увеличением повторяемости экстремально высоких температур в отдельных регионах России. Статистически значимое увеличение повторяемости высоких температур в последние десятилетия отмечается во все сезоны года на юге ЕТР с максимальными темпами 4-6 дней/сезон/10 лет летом на северо-восточном побережье Черного моря (Рис. 3.3). На юге Сибири и полуострове Камчатка увеличение повторяемости высоких температур также отмечается летом и осенью, но с меньшими темпами 1 - 3 дней/сезон/10 лет.

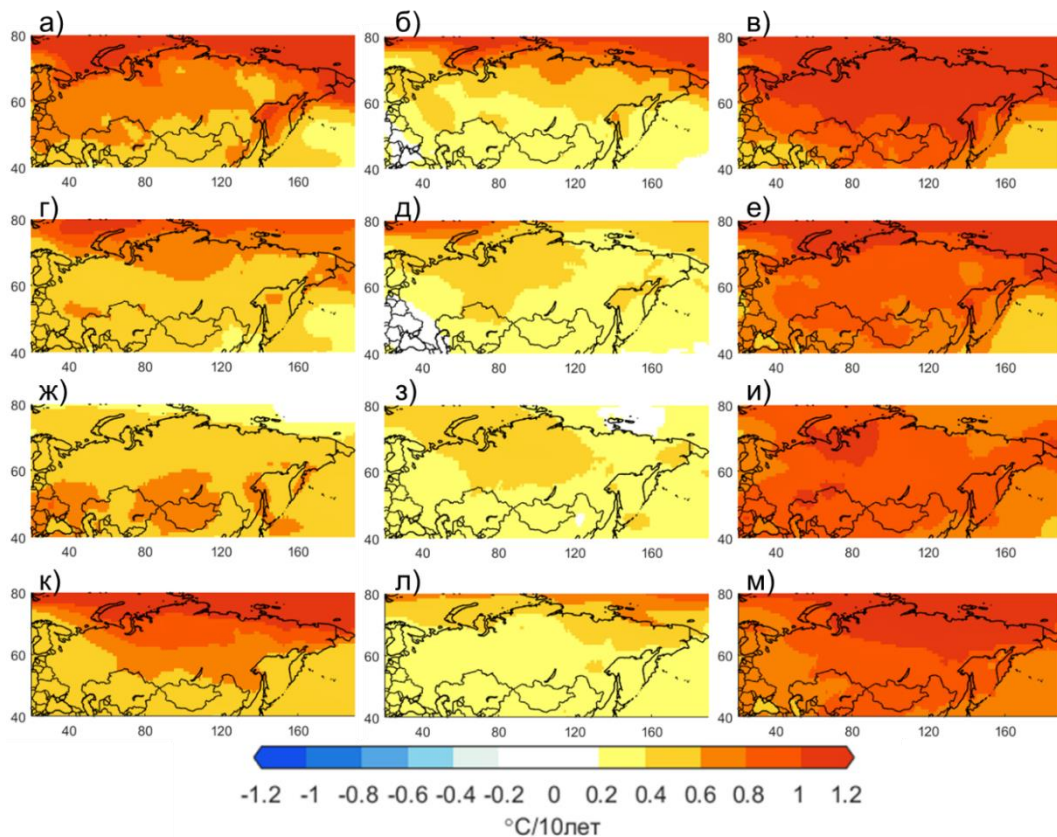


Рисунок 3.2. Средние по моделям CMIP6 коэффициенты линейных трендов температуры воздуха на 2 м (в °C/10 лет) в 1991-2020 гг. по эксперименту historical и ssp245 (а, г, ж, к), в 2051-2080 гг. по сценариям SSP245 (б, д, з, л) и SSP585 (в, е, и, м) зимой (а-в), весной (г-е), летом (ж-и) и осенью (к-м).

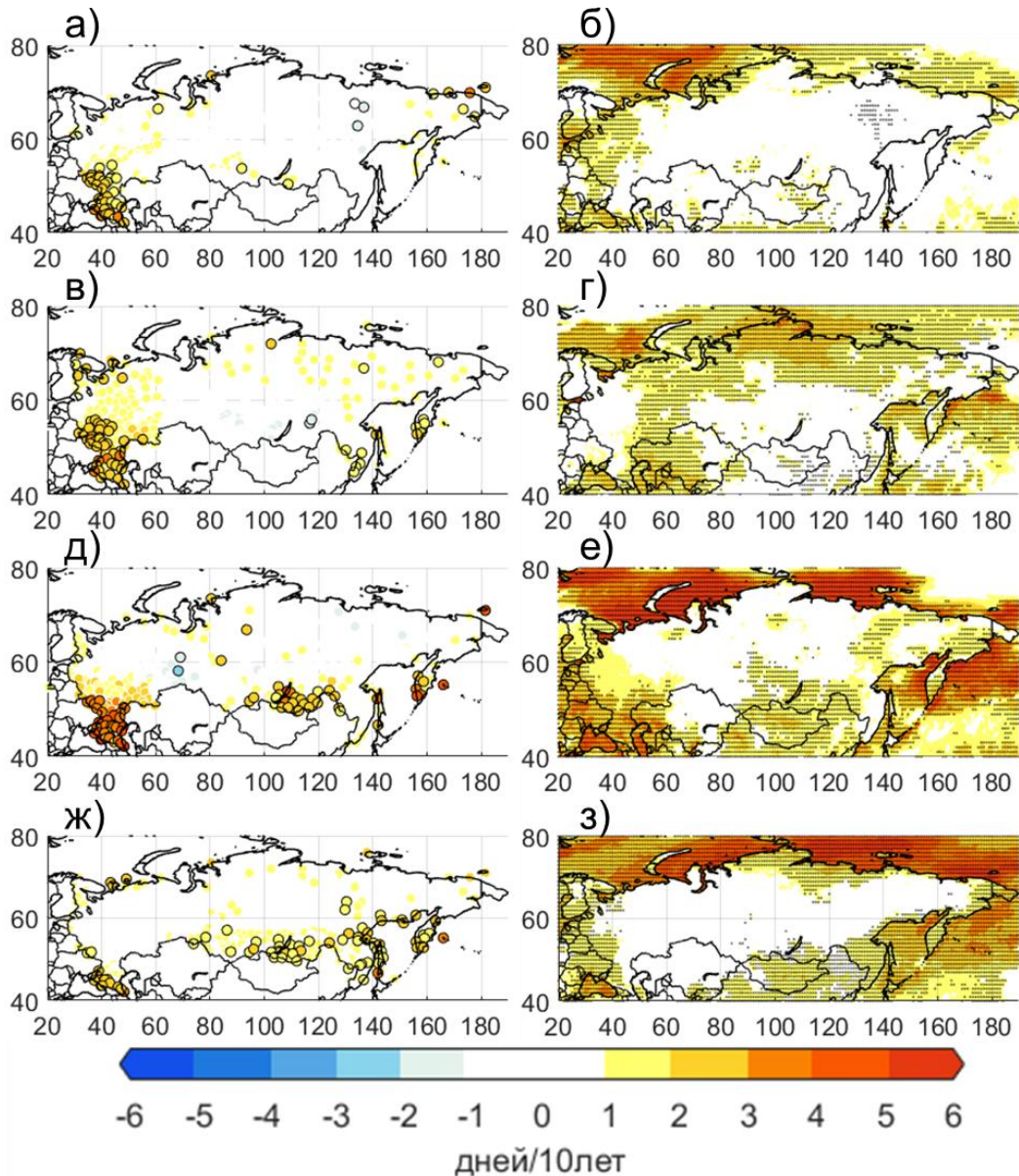


Рисунок 3.3. Коэффициенты линейного тренда повторяемости дней с экстремально высокими (выше 95%-го перцентиля в 1981-2010 гг.) температурами воздуха на 2 м (в дн./10 лет) по метеорологическим станциям (а, в, д, ж) и реанализу ERA5 (б, г, е, з) в 1991-2020 гг. для зимы (а, б), весны (в, г), лета (д, е) и осени (ж, з). Статистически значимые на уровне 0.05 тренды показаны жирными контурами для станций и штриховкой для реанализа.

По данным реанализа ERA5 в последние десятилетия частота дней с высокими температурами возрастает сильнее всего летом и осенью в районах Баренцева и Карского морей, а также моря Лаптевых, над сушей получено меньше статистически значимых изменений по сравнению с данными метеорологических станций. Так же, как по данным метеорологических станций, летом увеличение повторяемости высоких температур

отмечается на юге ЕТР, юге Сибири и полуострове Камчатка. Повторяемость высоких температур на юге ЕТР увеличивается также зимой и весной.

Для современного периода наибольшие значения трендов повторяемости дней с экстремально высокими температурами по данным ансамбля климатических моделей получены также для юга ЕТР летом (до 3-4 дн./сезон/10 лет на Черноморском побережье Кавказа). Для всей территории России в среднем по моделям отмечается небольшое увеличение повторяемости экстремально высоких температур на 1-2 дн./сезон/10 лет (Рис. 3.4).

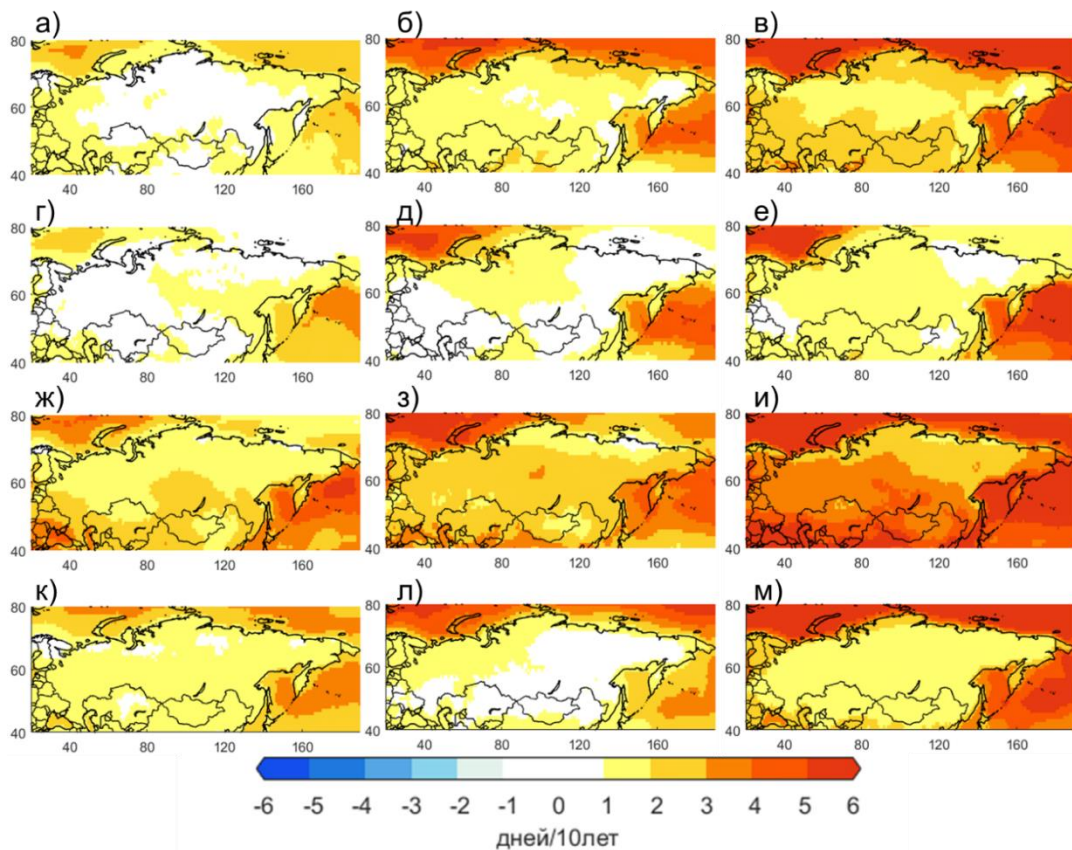


Рисунок 3.4. Средние по моделям СМIP6 коэффициенты линейных трендов повторяемости дней с экстремально высокими (выше 95%-го перцентиля в 1981 - 2010 гг.) температурами воздуха на 2 м (в дн./10 лет) в 1991-2020 гг. по эксперименту *historical* и *ssp245* (а, г, ж, к), в 2051-2080 по сценариям *ssp245* (б, д, з, л) и *ssp585* (в, е, и, м) зимой (а-в), весной (г-е), летом (ж-и) и осенью (к - м).

В среднем по ансамблю климатических моделей во второй половине XXI века повторяемость высоких температур продолжит увеличиваться, над поверхностью морей и океанов тенденции выражены сильнее и превышают 4 дней/сезон/10 лет во все сезоны года для периода 2051-2080 гг. Над сушей по сценарию SSP245

во второй половине XXI века тренды числа дней с экстремально высокими температурами в среднем ниже, чем по сценарию SSP585, что связано с замедлением увеличения концентраций парниковых газов к середине XXI века в данном эксперименте и стабилизации значений радиационного форсинга. По сценарию SSP585 повышение повторяемости экстремально высоких температур будет продолжаться, наибольшие темпы увеличения частоты экстремально высоких температур во второй половине XXI столетия получены для летнего сезона, на юге ЕТР среднемоделная величина тренда составляет до 6 дней/сезон/10 лет.

Тенденции повторяемости экстремально низких температур представлены в (Прил. 6, 7). В современный период отмечено уменьшение количества дней с экстремально низкими температурами в северо-восточной Сибири на 2 - 3 дня/сезон/10 лет зимой, летом и осенью (Прил. 6). Также частота низких температур значительно уменьшается летом на юге ЕТР и в Восточной Сибири (на 2 – 3 дня/сезон/10 лет) и осенью на ЕТР (центральная часть ЕТР, северо-запад и побережье Арктики) (более чем на 3 дня/сезон/10 лет). При этом зимой как по данным метеорологических станций, так и по реанализу ERA5, увеличивается повторяемость экстремально низких температур на юге Западной и Восточной Сибири, где также отмечено понижение среднесезонных температур, однако данное увеличение на станциях статистически не значимо. К сожалению, данные климатических моделей в среднем не воспроизводят эту особенность понижения температур в современный период (Прил. 7). К концу XXI столетия по моделям изменение вероятности экстремально низких температур не обнаруживается, по отдельным моделям повторяемость температур ниже 5%-го перцентиля в 1981-2010 гг. может составить 0-1 дней/сезон, то есть практически не фиксироваться, что приводит к практически нулевым трендам этой характеристики в 2051-2080 гг.

В качестве примера изменения характеристик температурного режима в регионах России, а также оценки межмодельного разброса исследуемых параметров, на (Рис. 3.5, 3.6, 3.7) приведены осредненные временные ряды характеристик температуры для двух регионов: юга ЕТР (35-45° в.д., 42-48° с.ш.) и Алтайского региона (80 - 90° в.д., 49 - 54° с.ш.). Как видно из приведенных графиков, межгодовая изменчивость средних для ансамбля характеристик существенно ниже, чем по данным реанализа, так как процедура осреднения неминуемо приводит к сглаживанию

межгодовых флуктуаций, что выводит на первый план изменения, связанные с внешним воздействием на климатическую систему. Однако, результаты индивидуальных моделей демонстрируют сравнимый с наблюдаемым диапазон межгодовой изменчивости температуры.

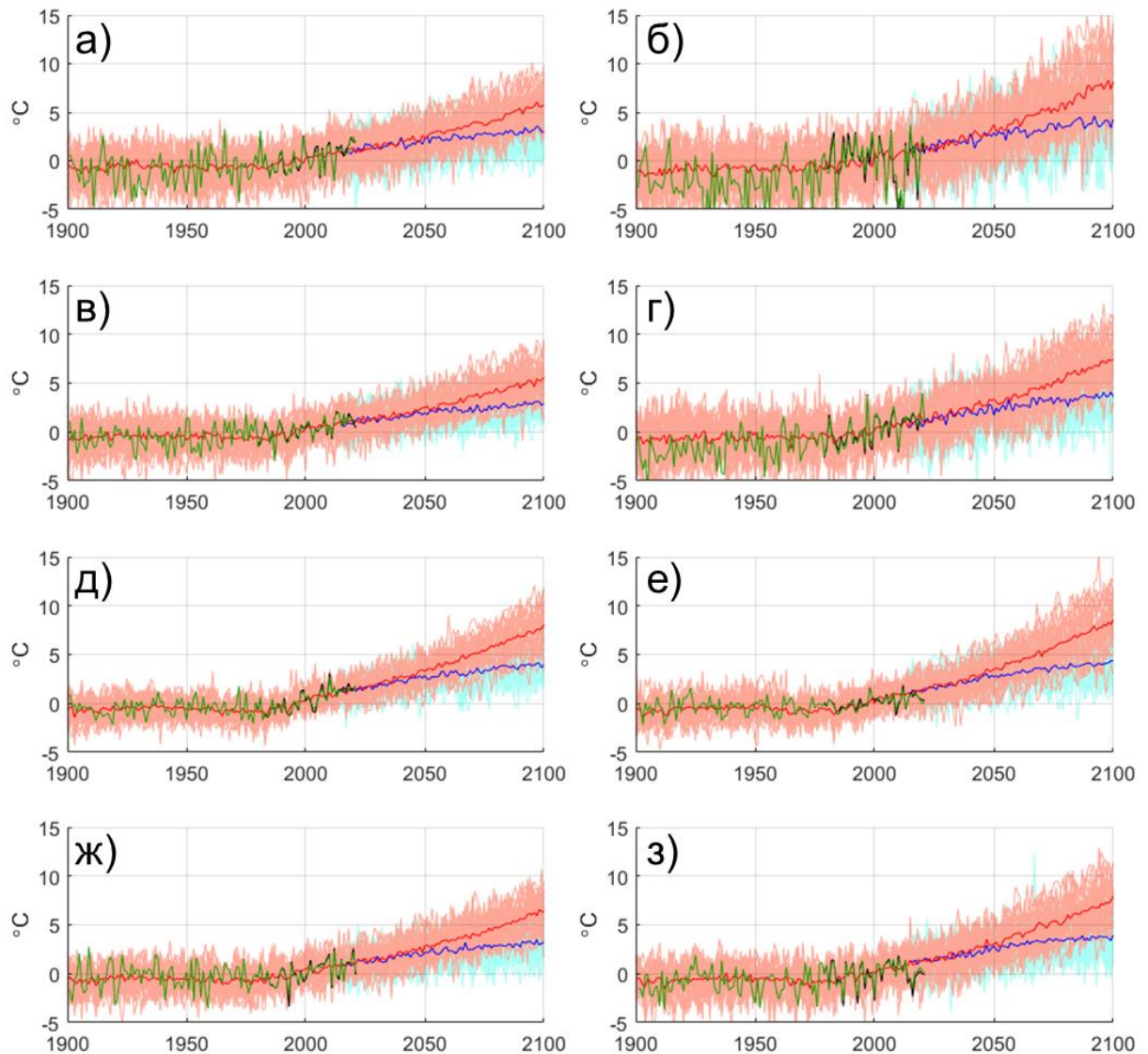


Рисунок 3.5. Аномалии приземной температуры воздуха (в °C относительно 1981 - 2010 гг.) на юге ЕТР (а, в, д, ж) и в Алтайском регионе (б, г, е, з) зимой (а, б), весной (в, г), летом (д, е) и осенью (ж, з) по данным реанализа ERA5 (черная кривая), архива CRU TS (зеленая кривая) и данным 34-х моделей CMIP6. Синей и красной жирными кривыми показаны средние по ансамблям SSP245 и SSP585 моделей значения. Результаты индивидуальных моделей ансамбля показаны голубыми и розовыми тонкими кривыми для сценариев SSP245 и SSP585, соответственно. До 2014 г. оба сценария и результаты моделирования идентичны.

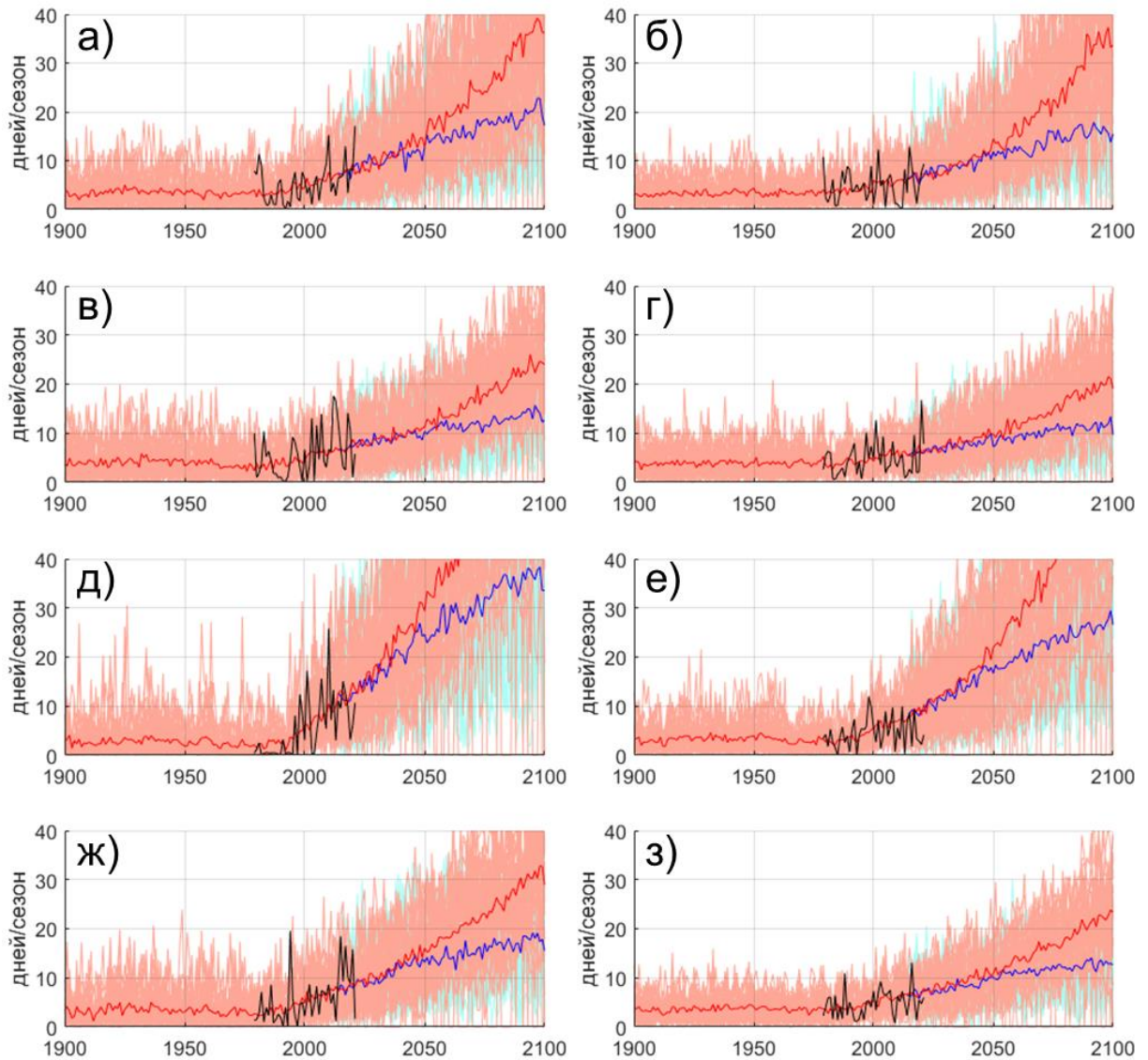


Рисунок 3.6. Изменение повторяемости дней с экстремально высокими (выше 95%-го перцентиля в 1981-2010 гг.) температурами воздуха на 2 м (в днях/сезон) на юге ЕТР (а, в д, ж) и в Алтайском регионе (б, г, е, з) зимой (а, б), весной (в, г), летом (д, е) и осенью (ж, з) по данным реанализа ERA5 (черная кривая) и данным 34 – х моделей CMIP6. Синей и красной жирными кривыми показаны средние по ансамблям SSP245 и SSP585 моделей значения. Результаты индивидуальных моделей ансамбля показаны голубыми и розовыми тонкими кривыми для сценариев SSP245 и SSP585, соответственно. До 2014 г. оба сценария и результаты моделирования идентичны.

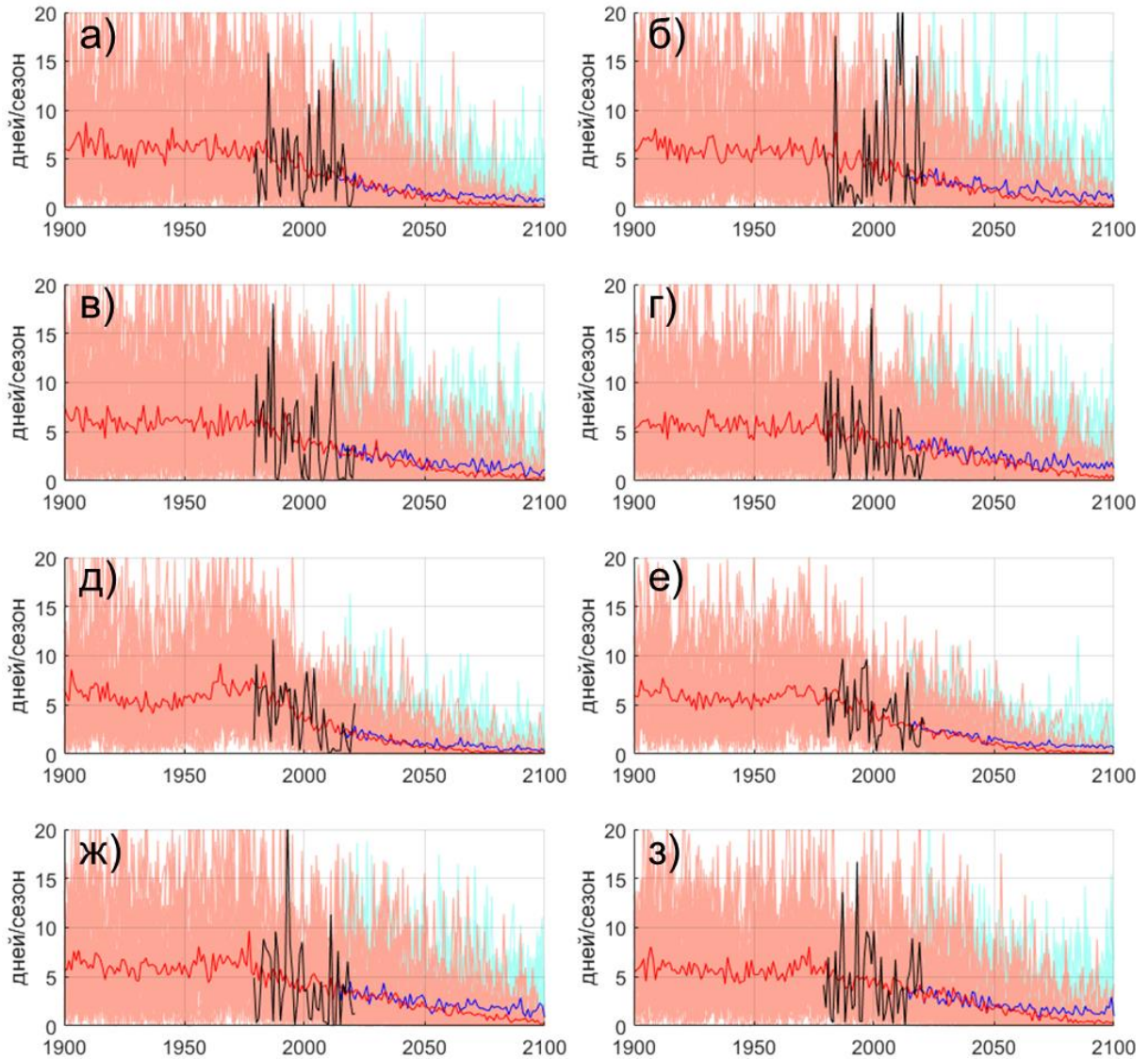


Рисунок 3.7. Изменение повторяемости дней с экстремально низкими (ниже 5%-го перцентиля в 1981-2010 гг.) температурами воздуха на 2 м (в днях/сезон) на юге ЕТР (а, в д, ж) и в Алтайском регионе (б, г, е, з) зимой (а, б), весной (в, г), летом (д, е) и осенью (ж, з) по данным реанализа ERA5 (черная кривая) и данным 34 – х моделей CMIP6. Синей и красной жирными кривыми показаны средние по ансамблям SSP245 и SSP585 моделей значения. Результаты индивидуальных моделей ансамбля показаны голубыми и розовыми тонкими кривыми для сценариев SSP245 и SSP585, соответственно. До 2014 г. оба сценария и результаты моделирования идентичны.

Изменения исследуемых характеристик соответствуют ожидаемым при глобальном потеплении тенденциям — росту средней температуры при снижении/росте числа дней с экстремально низкими/высокими температурами во все сезоны года. По данным климатических моделей в ближайшие 20 лет изменения среднесезонных температур

и числа дней с экстремально высокой температурой для выбранных регионов практически не зависят от выбора сценария антропогенного воздействия и меняются приблизительно с теми же темпами, как и в современный период.

Начиная с 2050 - х гг. результаты сценария SSP245 показывают стабилизацию значений среднесезонных температур воздуха, к концу XXI столетия аномалии среднесезонной температуры (по сравнению со средними значениями в 1981-2010 гг.) в среднем по моделям могут составить 3-4°C как на юге ЕТР, так и в Алтайском регионе. По сценарию SSP585, напротив, рост температуры к концу XXI столетия продолжится. На юге ЕТР температуры в среднем по моделям могут превысить норму 1981-2010 гг. на 5°C зимой, весной и осенью, а летом на 7-8°C. Для Алтайского региона аномалии температуры в среднем во все сезоны года могут составить 6-8°C, однако стоит помнить, что климатические модели не воспроизводят понижение температуры в современный период в этом регионе, данное несоответствие может отразиться на расчетах будущих изменений климата.

Повторяемость дней с экстремально высокими температурами (Рис. 3.6) в выбранных регионах значительно увеличивается. По сценарию SSP245 к концу века частота дней с экстремально высокими температурами может достигать 10-20 дней/сезон зимой, весной и осенью, летом среднемоделные оценки составляют 25-30 дней/сезон в Алтайском регионе и 30-35 дней/сезон на юге ЕТР. По сценарию SSP585 увеличение повторяемости экстремально высоких температур происходит еще быстрее, зимой в выбранных регионах экстремальные температуры могут к концу XXI столетия отмечаться 35-40 дней/сезон, а летом более 60 дней/сезон, то есть вероятность экстремально высоких температур может вырасти в 7-8 раз по сценарию SSP245 и более чем в 10 раз по сценарию SSP585 по сравнению с периодом 1981-2010 гг. Число дней с экстремально низкими температурами (Рис. 3.7) значительно уменьшается и по отдельным моделям может приближаться к нулю начиная с 2070-х гг. Быстрее всего частота дней с экстремально низкими температурами уменьшается летом, когда для отдельных моделей повторяемость уже к 2040-м гг. снижается практически до нуля.

3.3. Изменения характеристик осадков на территории России в XX - XXI вв. по данным ансамбля моделей СМIP6²

Результаты расчета коэффициентов линейного тренда сезонных сумм осадков относительно периода 1981-2010 гг., повторяемости дней с осадками выше 0.1 мм/день и повторяемости дней с экстремальными осадками (выше 95%-го перцентиля в 1981 – 2010 гг.) по данным метеорологических станций и реанализа ERA5 за период 1991-2020 гг. представлены на (Рис. 3.8-3.10). В (Прил. 8, 9) также приведены результаты расчетов трендов интенсивности осадков и вклада экстремальных осадков в общую сумму.

По сравнению с показателями температурного режима, характеристики режима осадков отличаются большей пространственной неоднородностью и сезонными различиями. Для зимнего сезона по данным метеорологических станций значимое увеличение сезонных сумм осадков на 15-20%/10 лет отмечается лишь на отдельных станциях на побережье Дальнего Востока и в Поволжье (Рис. 3.8. а). На юге Сибири, в Приморском крае и центральной части ЕТР отмечено статистически не значимое увеличение осадков на 5-10%/10 лет. Слабое уменьшение сезонных сумм осадков отмечено для Западной и Восточной Сибири и юга ЕТР. Весной увеличение сумм осадков преобладает на большинстве метеорологических станций. Наибольшие темпы повышения сумм осадков весной отмечены для юга Западной и Восточной Сибири, северо-восточной Сибири и Приморского края. Уменьшение сумм осадков получены на отдельных станциях Арктического побережья (Рис. 3.8 в). Данные оценки согласуются с полученными ранее в [Третий оценочный доклад..., 2022], где для весеннего сезона в среднем по стране сезонные суммы осадков увеличиваются на 5.9%/10 лет (Рис. 1.4). Летом отчетливо выражено уменьшение сумм осадков в двух регионах страны: на юге Восточной Сибири (Забайкальский край, республика Бурятия) и юге ЕТР. Увеличение летних сумм осадков отмечается для отдельных станций Западной Сибири, побережья Охотского моря и о. Сахалин. Осенью на станциях преобладает статистически не значимое уменьшение осадков на 6-9%/10 лет.

² Раздел 3.3 частично подготовлен на основе статьи Алешина М.А., Семенов В.А. *Изменения характеристик осадков на территории России в XX-XXI вв. по данным ансамбля моделей СМIP6 //Фундаментальная и прикладная климатология. – 2022. – Т. 8. – №. 4. – С. 424-440.*

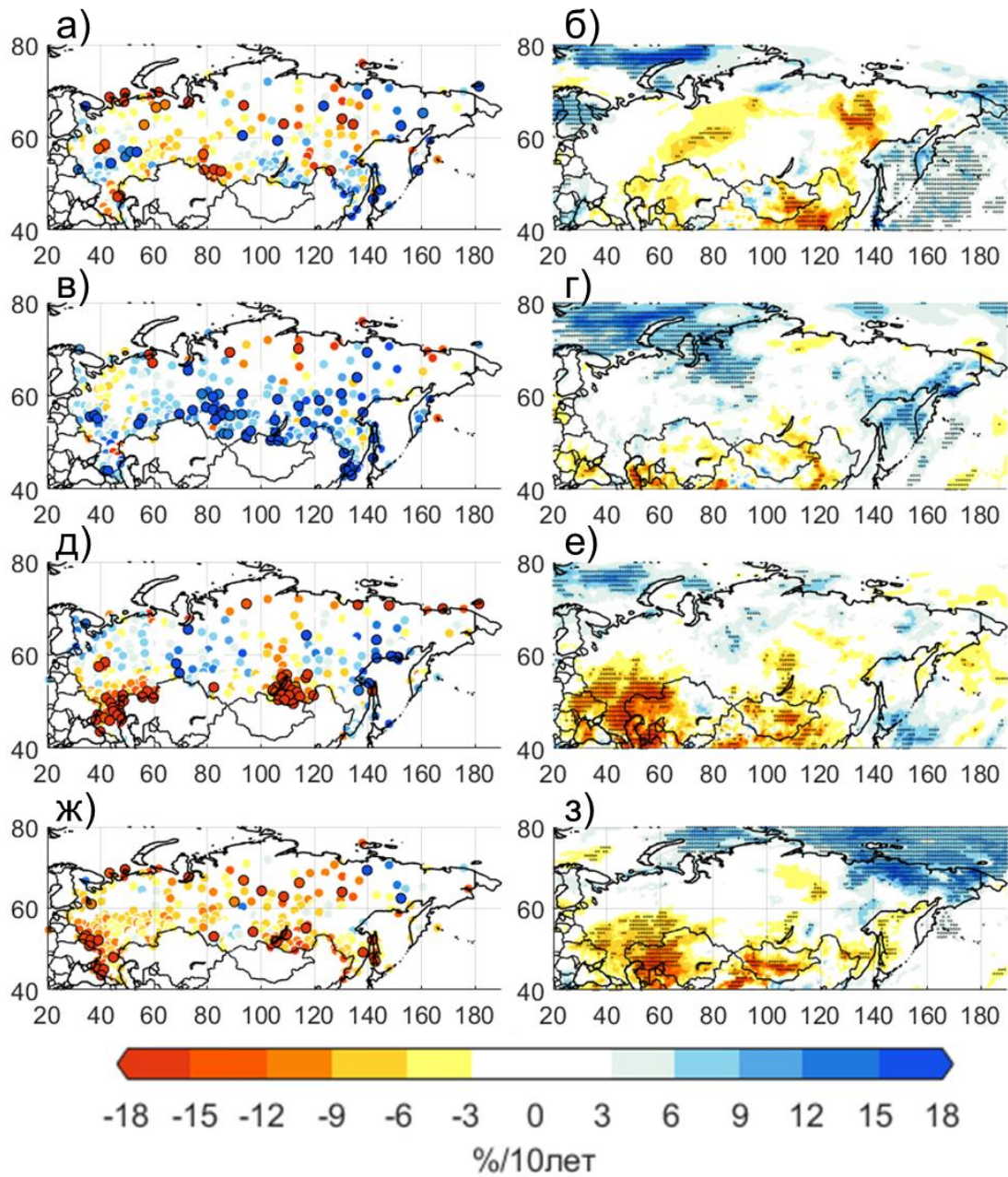


Рисунок 3.8. Коэффициенты линейного тренда сумм осадков (%/10 лет относительно периода 1981-2010 гг.) по метеорологическим станциям (а, в, д, ж) и реанализу ERA5 (б, г, е, з) в 1991-2020 гг. для зимы (а, б), весны (в, г), лета (д, е) и осени (ж, з). Статистически значимые на уровне 0.05 тренды показаны жирными контурами для станций и штриховкой для реанализа.

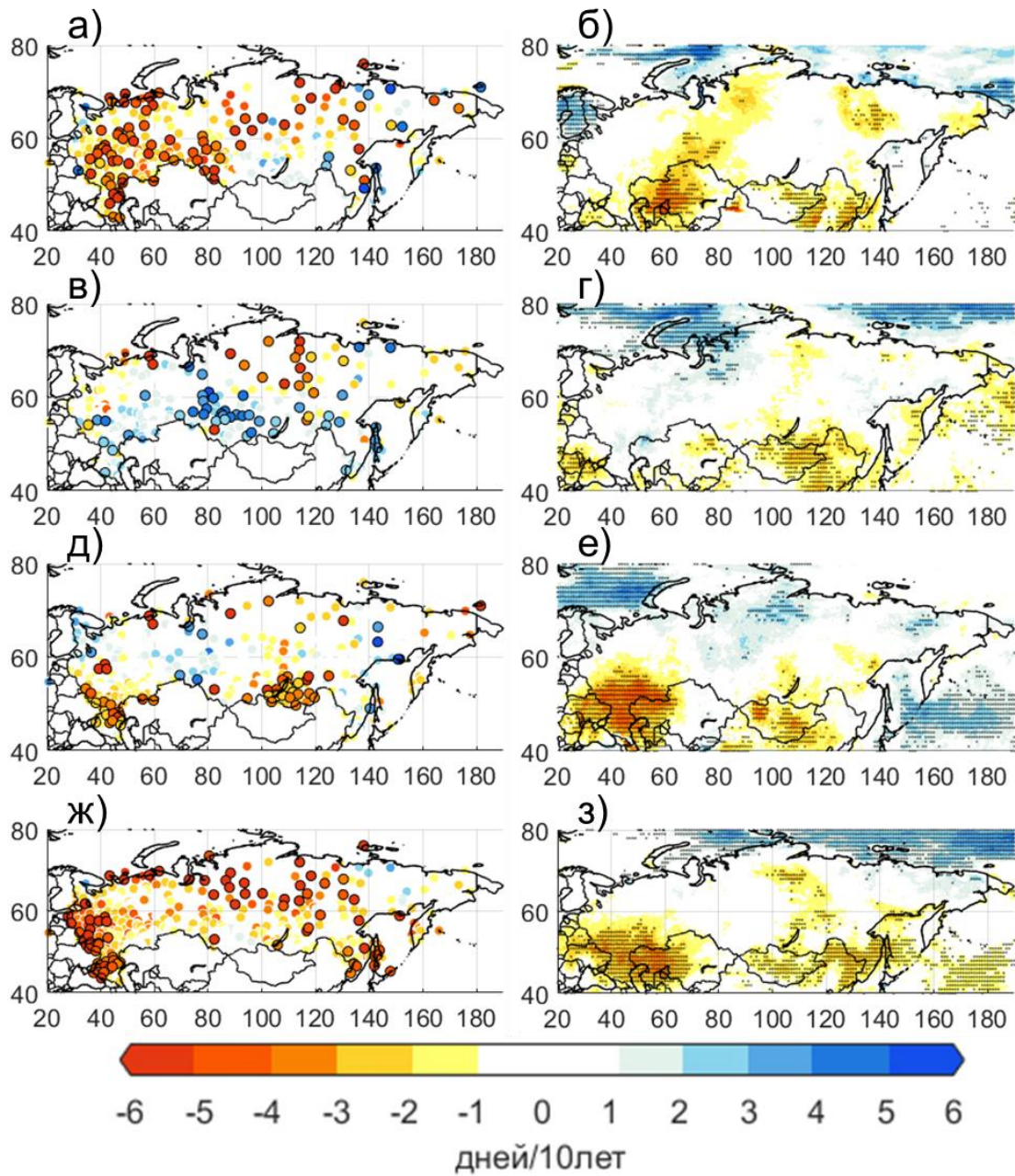


Рисунок 3.9. Коэффициенты линейного тренда повторяемости дней с осадками (≥ 0.1 мм/день в дн./10 лет) по метеорологическим станциям (а, в, д, ж) и реанализу ERA5 (б, г, е, з) в 1991-2020 гг. для зимы (а, б), весны (в, г), лета (д, е) и осени (ж, з). Статистически значимые на уровне 0.05 тренды показаны жирными контурами для станций и штриховкой для реанализа.

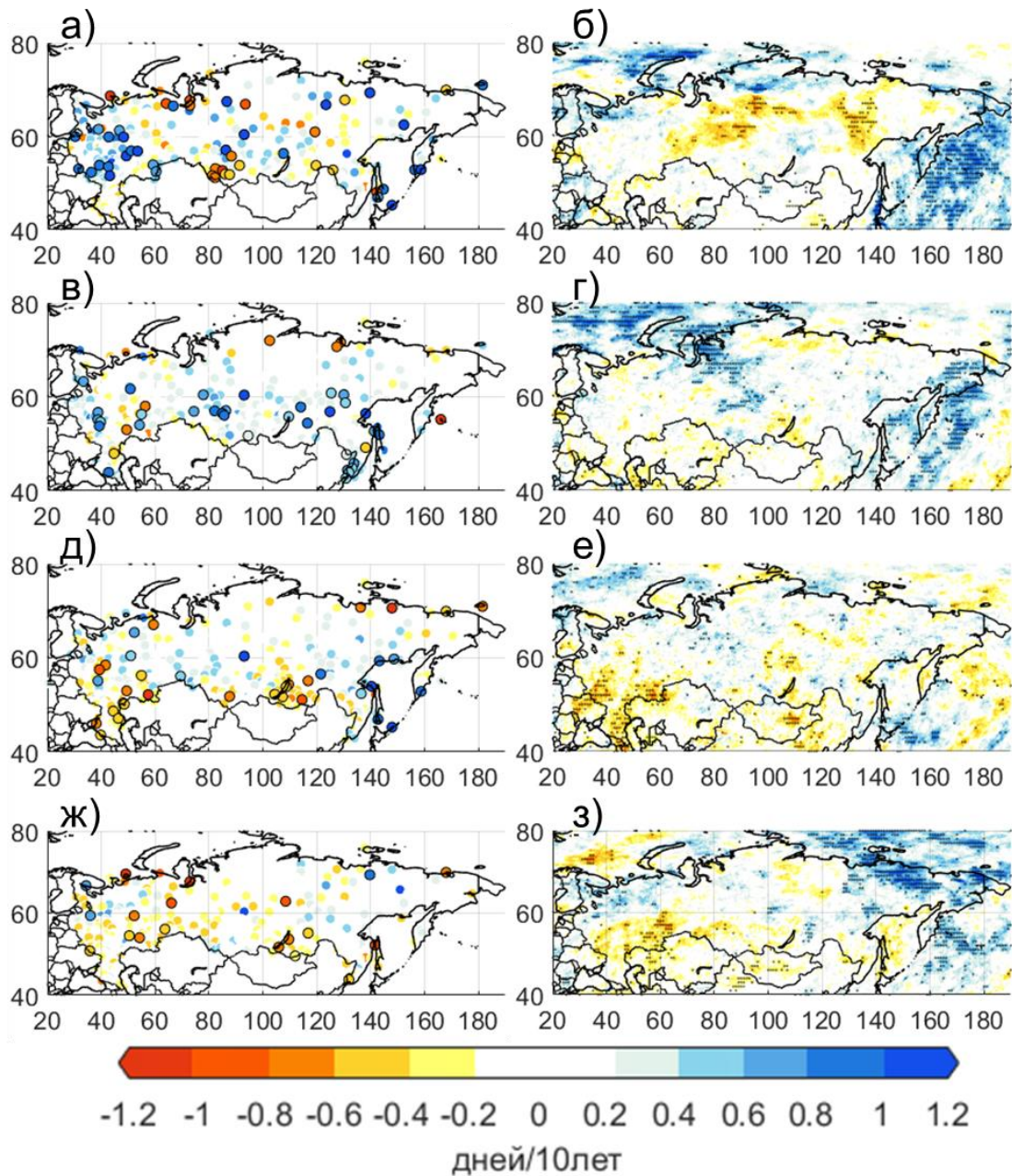


Рисунок 3.10. Коэффициенты линейного тренда повторяемости дней с экстремальными осадками (в дн./10 лет) по метеорологическим станциям (а, в, д, ж) и реанализу ERA5 (б, г, е, з) в 1991-2020 гг. для зимы (а, б), весны (в, г), лета (д, е) и осени (ж, з). Статистически значимые на уровне 0.05 тренды показаны жирными контурами для станций и штриховкой для реанализа.

При изучении режима осадков важно рассматривать не только изменение средних показателей, но и того, как меняется вклад осадков разной интенсивности. Например, осенью в большинстве регионов страны и летом на юге ЕТР и юге Сибири уменьшение сумм осадков сопровождается уменьшением частоты дней с осадками (Рис. 3.9). Зимой, наоборот, для центральной части ЕТР небольшое увеличение сумм осадков

сопровождается уменьшением общей частоты выпадения осадков, т.е. осадки в последние десятилетия стали выпадать реже, но сильнее, что подтверждается повышением повторяемости экстремальных осадков в этом регионе на 1-1.5 дней/сезон (Рис. 3.10). Для весны на юге Сибири отмечено небольшое увеличение повторяемости экстремальных осадков, связанное как с увеличением суммы осадков, так и их общей повторяемости.

По данным реанализа ERA5 увеличение суммарного количества осадков и повторяемости экстремальных осадков ярче выражено над акваториями морей Северного Ледовитого и Тихого океанов, над сушей полученные тенденции преимущественно не являются статистически значимыми. Это может быть обусловлено сильной межгодовой изменчивостью среднесезонных осадков.

В (Прил. 8, 9) также приведены результаты расчетов трендов для вклада экстремальных осадков в общую сумму и интенсивности осадков. Для большинства станций тренды в современный период статистически не значимы. Интенсивность осадков и вклад экстремальных осадков увеличились в последние десятилетия зимой в центральной части ЕТР и на юге Уральских гор. Весной также получено увеличение этих двух показателей на юге Сибири и Дальнего Востока. Также интенсивность осадков в последние десятилетия увеличилась летом на побережье Охотского моря. Уменьшение средней интенсивности осадков отмечено летом на юге ЕТР и Урала, в Забайкальском крае.

Тенденции изменений характеристик осадков для последних десятилетий и второй половины XXI столетия по данным климатических моделей показаны на (Рис. 3.11-3.13).

Зимой для современного периода (1991-2020 гг.) климатические модели в среднем для ансамбля показывают практически повсеместный рост сезонных сумм осадков, что не соответствует эмпирическим данным. На большей части территории России зимние суммы осадков увеличиваются на 3-6%/10 лет, на Чукотском полуострове и в акваториях Восточно-Сибирского и Чукотского морей до 10%/10 лет (Рис. 3.11 а). Также практически на всей территории России зимой получен относительно небольшой рост числа дней с экстремальными осадками (0.2-0.4 дней/10 лет) (Рис. 3.13 а), повторяемость дней с осадками по данным моделей с средним не меняется. Весной и осенью климатические модели также в среднем показывают небольшое увеличение сезонных сумм осадков до 6%/10 лет и повторяемости дней с экстремальными осадками. Летом по данным моделей в 1991-2020 гг. лишь на юге ЕТР в среднем отмечается небольшое снижение количества дней с осадками на 1-2 дня/10 лет и уменьшение сезонных сумм.

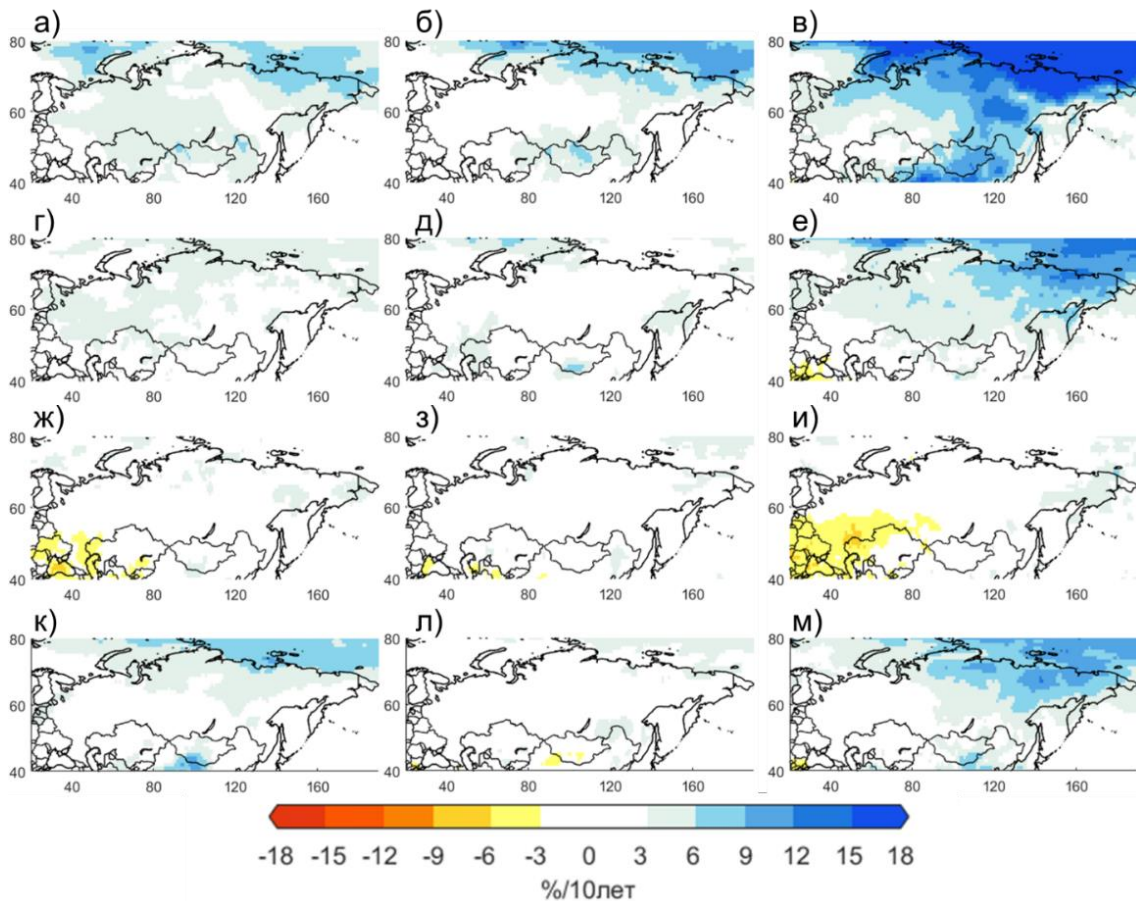


Рисунок 3.11. Средние по моделям CMIP6 коэффициенты линейных трендов сумм осадков (%/10 лет относительно периода 1981-2010 гг.) в 1991-2020 гг. по эксперименту historical и ssp245 (а, г, ж, л), в 2051-2080 по сценариям ssp245 (б, д, з, л) и ssp585 (в, е, и, м) зимой (а-в), весной (г-е), летом (ж-и) и осенью (к-м).

Для периода 2051-2080 гг. отмеченные по моделям для современного периода тенденции усиливаются по сценарию SSP585, по сценарию SSP245 значимых однонаправленных тенденций не обнаружено. В среднем по моделям для сценария SSP585 увеличение сезонных сумм осадков получено в восточной части страны для всех сезонов года, кроме лета (Рис. 3.11). Зимой средние оценки трендов сезонных сумм осадков наибольшие и составляют над сушей 10-15%/10 лет с максимальными скоростями роста на севере Восточной Сибири и в акваториях Восточно-Сибирского и Чукотского морей (до 20%/10 лет). Также зимой, весной и осенью практически на всей территории страны в середине XXI столетия может происходить увеличение повторяемости экстремальных осадков (Рис. 3.13), количественная оценка среднемодельных трендов составляет от 0.4-0.6 дней/10 лет на ЕТР до 0.6-0.8 дней/10 лет в горах северо-восточной Сибири. Зимой на северо-востоке Сибири увеличение частоты

экстремальных осадков также сочетается с небольшим увеличением общей повторяемости дней с осадками (Рис. 3.12). Летом по среднемоделным оценкам уменьшение сезонных сумм осадков и повторяемости дней с осадками получено для юга ЕТР как для современного климата, так и для второй половины XXI столетия. Для остальных регионов выбранные характеристики осадков в целом практически не меняются. Тренды повторяемости экстремальных осадков летом в среднем по моделям близки к нулю. Таким образом, осредненные по климатическим моделям тренды слабо воспроизводят полученное по эмпирическим данным значимое уменьшение сумм осадков и общей повторяемости выпадения осадков на ЕТР.

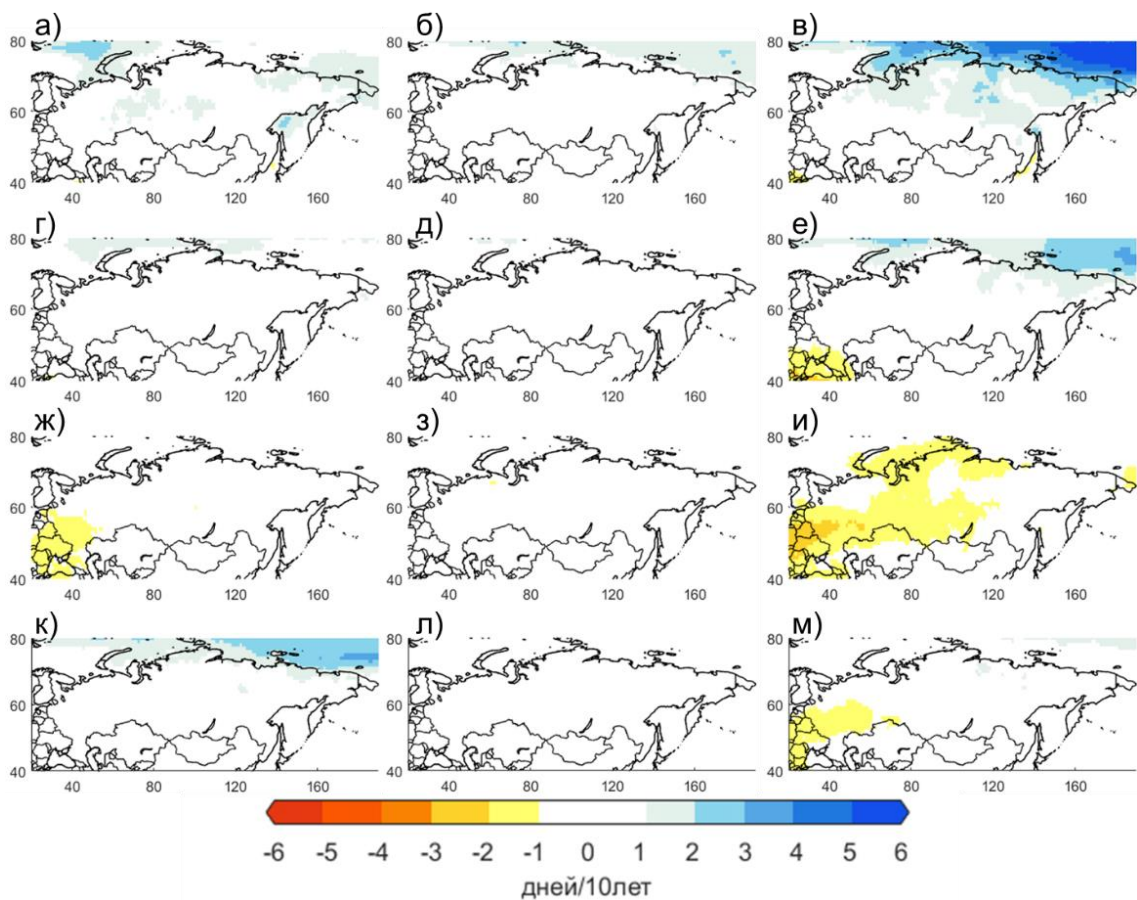


Рисунок 3.12. Средние по моделям CMIP6 коэффициенты линейных трендов повторяемости дней с осадками (≥ 0.1 мм/день в днях/10 лет) в 1991-2020 гг. по эксперименту historical и ssp245 (а, г, ж, л), в 2051-2080 по сценариям ssp245 (б, д, з, л) и ssp585 (в, е, и, м) зимой (а-в), весной (г-е), летом (ж-и) и осенью (к-м).

Процедура осреднения данных климатических моделей приводит к сглаживанию результатов. Для эмпирических данных неустойчивые значения трендов связаны преимущественно с сильной межгодовой изменчивостью характеристик осадков. Для

результатов большого ансамбля климатических моделей целесообразно оценивать межмодельный разброс полученных значений. На (Рис. 3.14) представлены оценки количества моделей, для которых были получены положительные значения трендов выбранных характеристик.

Зимой, как было отмечено ранее, по данным климатических моделей в среднем общее количество осадков увеличивается. Данный результат связан с тем, что для зимнего сезона увеличение сезонных сумм осадков и повторяемости сильных осадков отмечено в среднем для 25-30 моделей (из 34). Для количества дней с осадками и повторяемости экстремальных осадков этот показатель зимой ниже (15-20) и составляет примерно половину всех использованных моделей. Таким образом, при осреднении трендов повторяемости дней с осадками и были получены значения близкие к нулю.

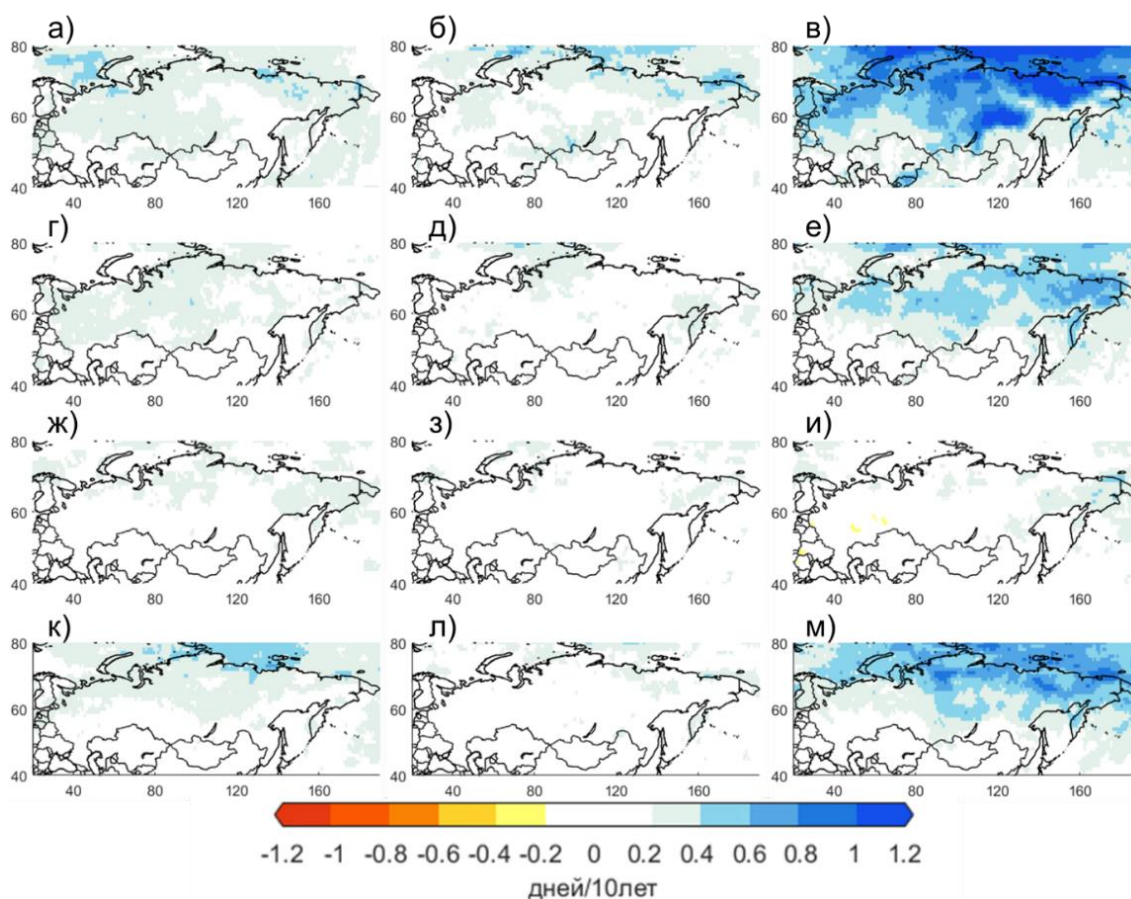


Рисунок 3.13. Средние по моделям CMIP6 коэффициенты линейных трендов повторяемости дней с экстремальными осадками (в днях/10 лет) в 1991-2020 гг. по эксперименту historical и ssp245 (а, г, ж, л), в 2051-2080 по сценариям ssp245 (б, д, з, л) и ssp585 (в, е, и, м) зимой (а-в), весной (г-е), летом (ж-и) и осенью (к-м).

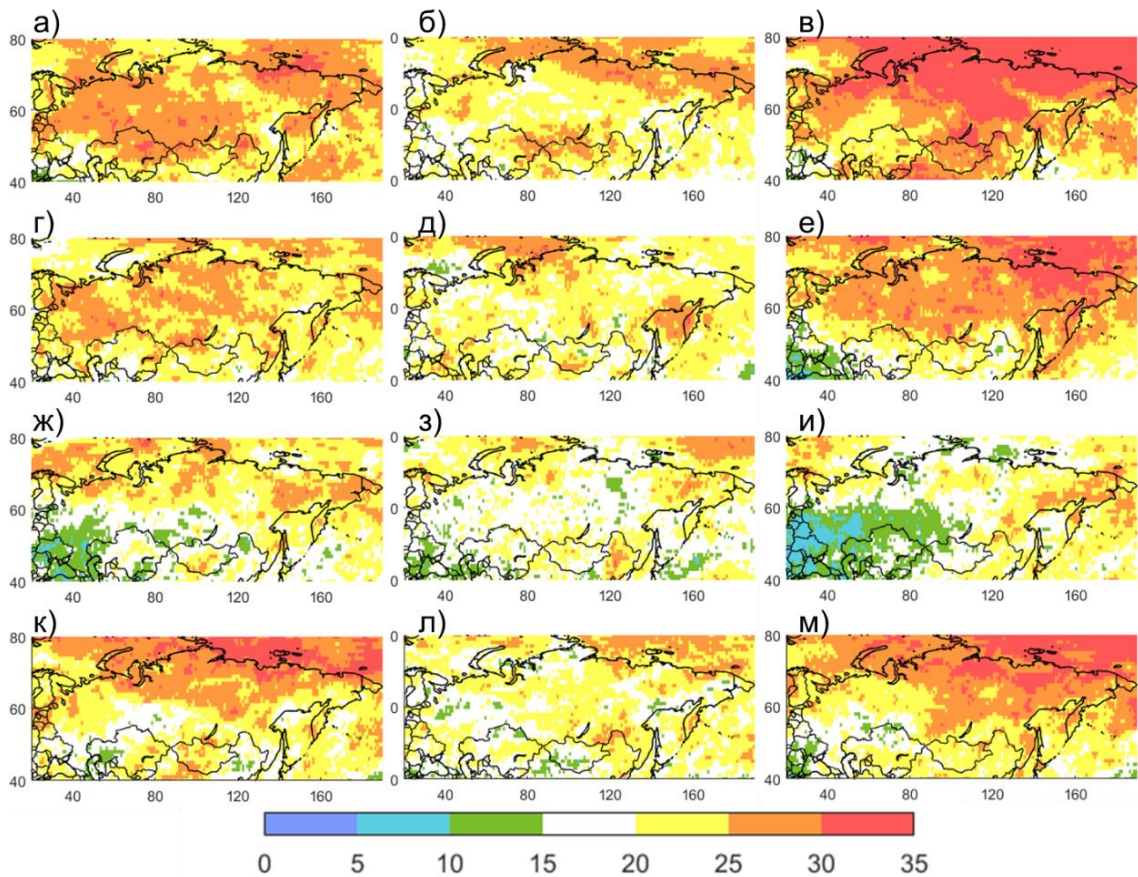


Рисунок 3.14. Количество моделей CMIP6 с положительными значениями коэффициентов линейных трендов сумм осадков (относительно периода 1981-2010 гг.) в 1991-2020 гг. по эксперименту *historical* и *ssp245* (а, г, ж, л), в 2051-2080 по сценариям *ssp245* (б, д, з, л) и *ssp585* (в, е, и, м) зимой (а-в), весной (г-е), летом (ж-и) и осенью (к-м).

Для летнего сезона больше половины моделей показывают отрицательные тренды относительных сумм осадков и количества дней с осадками выше 0.1 мм (на ETP количество моделей с положительными трендами составляют менее 10), поэтому для этого региона и было получено в среднем слабое уменьшение этой характеристики. Положительные тренды сумм летних осадков в 1991-2020 гг. более чем в половине моделей отмечаются в Красноярском крае и в республике Якутия. Однако, для периода 2021-2050 гг. количество моделей с положительными трендами в этих регионах также уменьшается. Аналогичные оценки для повторяемости дней с экстремальными осадками и общего числа дней с осадками приведены в (Прил. 10,11). Для зимнего сезона по сценарию SSP585 также большинство моделей (более 30 из 34) показывают увеличение зимой повторяемости как дней с осадками выше 0.1 мм/день, так и повторяемости экстремальных осадков. При этом летом большинство моделей показывают

отрицательные тренды повторяемости дней с осадками на всей территории России, а для экстремальных осадков преобладание отрицательных трендов характерно только для ЕТР и юга Восточной Сибири.

Таким образом, по эмпирическим данным зимой на территории России в 1991-2020 гг. отмечается увеличение сезонных сумм осадков и повторяемости дней с экстремальными осадками на побережье Дальнего Востока и в центральной части Европейской территории России. Также выражено уменьшение повторяемости дней с осадками на 4-6 дней /10 лет. Летом увеличение сумм осадков и повторяемости дней с осадками получено для отдельных станций Западной Сибири, побережья Охотского моря и о. Сахалин. Уменьшение сумм и повторяемости получены для юга ЕТР и юга Восточной Сибири. Отмечается несовпадение полученных тенденций по данным метеорологических станций и реанализа ERA5, которые могут быть связаны с сильной межгодовой изменчивостью осадков. Например, зимой по данным реанализа ERA5 увеличение сезонных сумм осадков и повторяемости дней с экстремальными осадками на Дальнем Востоке и в центре ЕТР меньше по абсолютным значениям и не являются статистически значимыми.

Как и при изучении температурного режима, для оценки межмодельного разброса данных климатических моделей далее в качестве примера приведены временные ряды осредненных характеристик осадков для двух контрастных регионов: юга ЕТР (35-45° в.д., 42-48° с.ш.) и Восточной Сибири (120 - 140° в.д., 60 - 65° с.ш.) (Рис. 3.15, 3.16). Для показателей осадков характерен большой межмодельный разброс, в то же время, результаты индивидуальных моделей демонстрируют сравнимый с наблюдаемым диапазон межгодовой изменчивости осадков. Следует также отметить, что как по данным реанализа, так и по климатическим моделям, в современный период все изменения выбранных характеристик осадков не выходят за пределы межгодовой изменчивости, что и объясняет низкие значения трендов в современный период (Рис. 3.8-3.10).

На юге ЕТР в XX-XXI вв. не отмечено значимого изменения сезонных сумм осадков, лишь для летнего сезона к концу XXI в. может отмечаться небольшое уменьшение сезонных сумм в среднем на 10% по сценарию SSP245 и до 30% к концу XXI в. по SSP585 (Рис. 3.15 а, в, д, ж). При этом зимой, весной и осенью в регионе после 2050-х гг. отмечается увеличение доли экстремальных осадков в общей сумме, которое наблюдается при отсутствии значимых трендов в суммарном количестве осадков, что

может частично подтверждать выводы об изменении вклада обложных и ливневых осадков при наблюдаемых изменениях климата [Чернокульский и др., 2018].

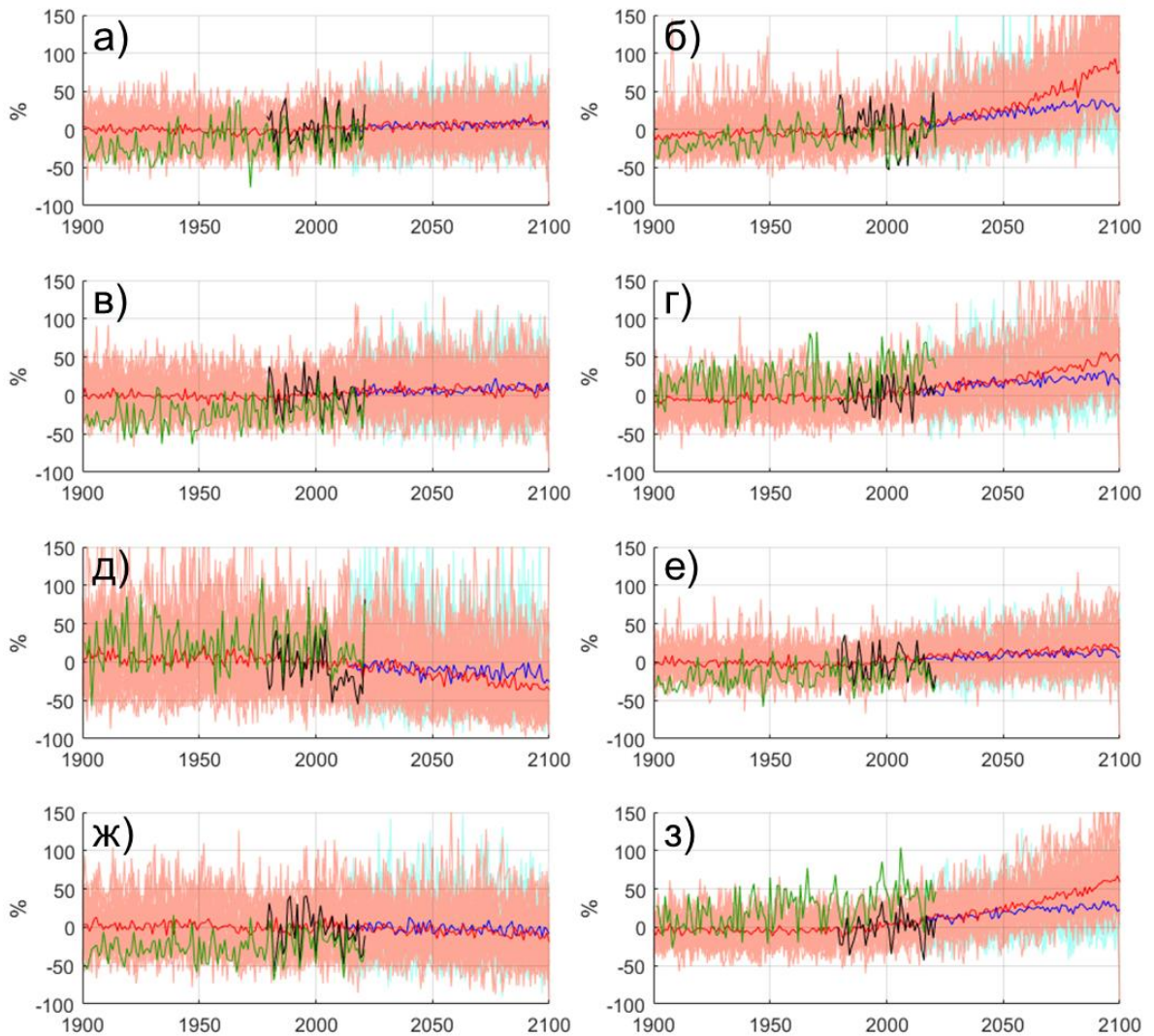


Рисунок 3.15. Изменение сезонных сумм осадков (в % к 1981-2010 гг.) на юге ЕТР (а, в, д, ж) и в Восточной Сибири (б, г, е, з) зимой (а, б), весной (в, г), летом (д, е) и осенью (ж, з) по данным наблюдений CRUTS4.06 (зеленая кривая), ERA5 (черная кривая) и данным 34-х моделей CMIP6. Синей и красной жирными кривыми показаны средние по ансамблям SSP245 и SSP585 значения. Результаты индивидуальных моделей ансамбля показаны голубыми и розовыми тонкими кривыми для сценариев SSP245 и SSP585, соответственно.

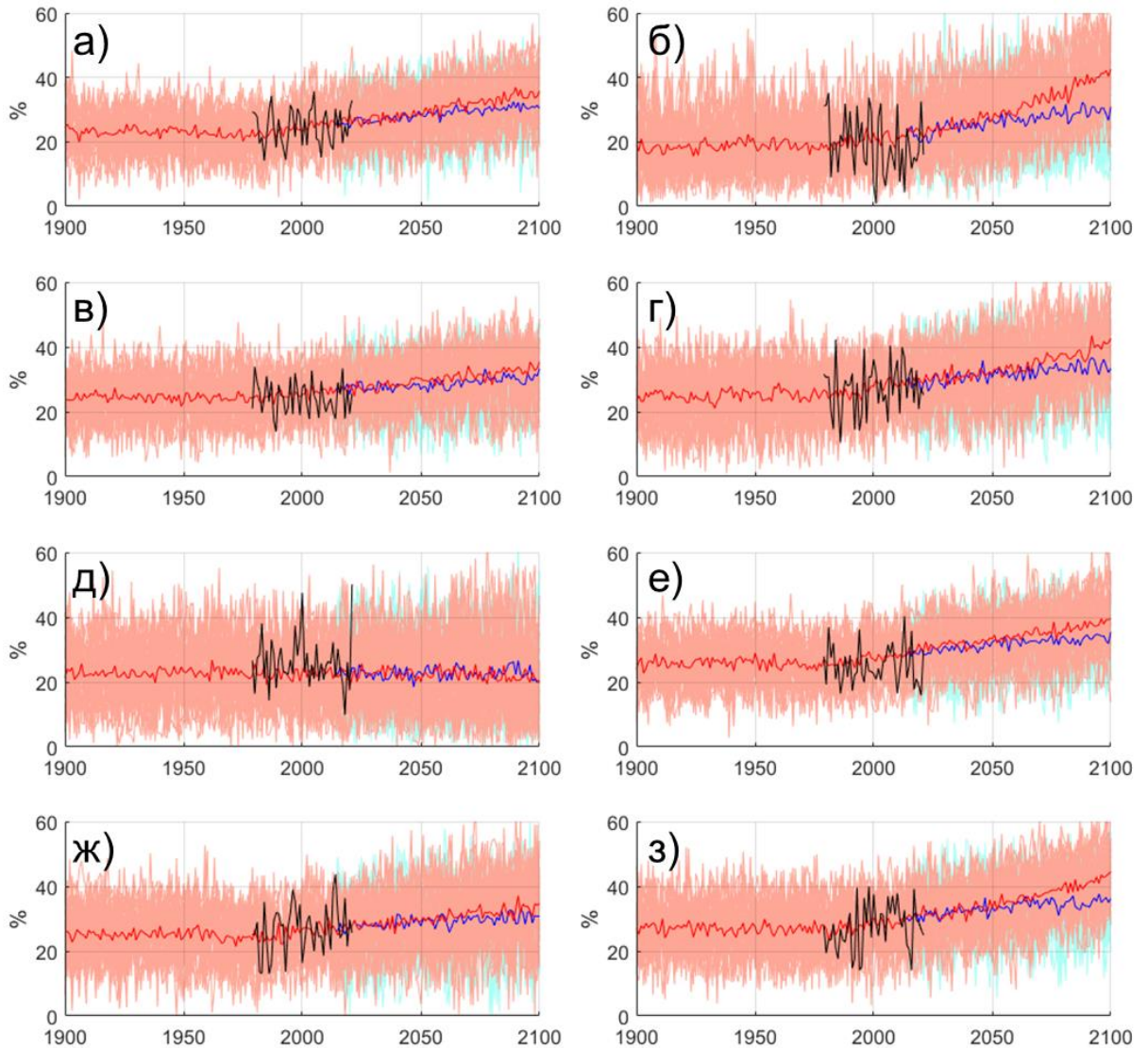


Рисунок 3.16. Изменение вклада экстремальных осадков в общую сумму (в %) на юге ЕТР (а, в, д, ж) и в Восточной Сибири (б, г, е, з) зимой (а, б), весной (в, г), летом (д, е) и осенью (ж, з) по данным реанализа ERA5 (черная кривая) и данным 34 - х моделей CMIP6. Синей и красной жирными кривыми показаны средние по ансамблям SSP245 и SSP585 моделей значения. Результаты индивидуальных моделей ансамбля показаны голубыми и розовыми тонкими кривыми для сценариев SSP245 и SSP585, соответственно.

В Восточной Сибири, как и при оценках среднемодельных трендов, получены более выраженные изменения в режиме осадков: во все сезоны года в середины XXI в. увеличивается вклад экстремальных осадков в общую сумму (к концу столетия доля сильных осадков может увеличиться с 20% до 30-35% по сценарию SSP245 и до 40-45% по SSP585). При этом изменение сезонных сумм осадков отмечается для всех сезонов, кроме лета. По сценарию SSP 245 сезонные суммы увеличиваются в среднем на 30-40%,

самый сильный отклик отмечается для зимнего сезона по сценарию SSP585, когда сезонные суммы могут увеличиться на 80-90% (т.е. практически в 2 раза) по сравнению с современным климатом (Рис. 3.15 б, г, е, з).

Таким образом, на территории России в последние десятилетия зимой по данным метеорологических станций значимое увеличение сезонных сумм осадков на 15 - 20%/10 лет отмечается на отдельных станциях на побережье Дальнего Востока и в Поволжье. При этом для центральной части ЕТР статистически не значимое увеличение сумм осадков сопровождается уменьшением общей частоты выпадения осадков, что подтверждается повышением интенсивности осадков и повторяемости экстремальных осадков в этом регионе. Весной наибольшие темпы повышения сумм осадков отмечены для юга Западной и Восточной Сибири, северо-восточной Сибири и Приморского края, на юге Сибири отмечено небольшое увеличение повторяемости экстремальных осадков, связанное как с увеличением суммы осадков, так и их общей повторяемости. Летом отчетливо выражено уменьшение сумм осадков в двух регионах страны: на юге Восточной Сибири и юге ЕТР. Осенью на станциях преобладает статистически не значимое уменьшение осадков, которое сопровождается уменьшением частоты дней с осадками.

Модели климата в среднем для ансамбля показывают рост относительных сумм осадков и повторяемости экстремальных осадков на большей части территории России, ярче выраженное для сценария SSP585, причем данные тенденции могут усилиться в ближайшие десятилетия. Летом, напротив, для юга ЕТР в целом отмечается слабое уменьшение сезонных сумм осадков и количества дней с осадками. Однако, сильные межмодельные различия, особенно в летний сезон, не позволяют сделать однозначных выводов по поводу изменений характеристик осадков на территории России в ближайшие 30 лет. К концу XXI столетия изменения становятся более выраженными. Так, например, в центральной части ЕТР и на севере Сибири может произойти заметное увеличение зимних сумм осадков и повторяемости экстремальных осадков. При этом летом на ЕТР (особенно на юге) к концу XXI столетия возможно небольшое уменьшение сумм осадков и количества дней с осадками.

Глава 4. Региональные особенности современных изменений характеристик осадков в Черноморском регионе

На основе стационарных наблюдений и сеточных архивов данных исследованы особенности изменений климата Черного моря и его северо-восточного побережья за последние десятилетия. Выявлены основные тенденции изменений характеристик температуры и осадков, в том числе экстремальных. Проведено сравнение результатов реанализа с данными метеорологических наблюдений в регионе. Показано, что в регионе отмечается повышение приповерхностной температуры, ярче выраженное в теплое время года. Анализ трендов сезонных сумм осадков, а также интенсивности осадков, не показал статистически значимых изменений. Для зимних месяцев характерно слабое, статистически не значимое уменьшение сумм осадков над сушей и такое же небольшое их увеличение над поверхностью Черного моря. Летом, не смотря на значительное увеличение интегрального влагосодержания и конвективной доступной потенциальной энергии, не выявлено статистически значимого увеличения среднего количества осадков, их интенсивности, а также экстремальных значений. Показано, что это может быть связано с усилением дивергенции влаги в регионе вследствие интенсификации крупномасштабных нисходящих потоков.

По данным результатов численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы ECHAM5 проведена оценка вклада увеличения температуры поверхности Черного и Средиземного морей, а также глобальных изменений температуры поверхности океана (ТПО) за последние 40 лет в изменения характеристик летних экстремальных осадков на Черноморском побережье Кавказа в летний период. Выявлено, что в модели рост ТПО летом не приводит к статистически значимому увеличению среднего количества осадков и их экстремальных значений на Черноморском побережье Кавказа. Установлено, что увеличение ТПО на глобальном и региональном масштабах приводит к росту конвективной энергии преимущественно над поверхностью морей, что согласуется с данными реанализа. В то же время при глобальном повышении ТПО в модели происходит усиление процессов подавления конвекции, что может сдерживать увеличение интенсивности региональных осадков. Также отмечается усиление дивергенции влаги над Черным морем и его восточным побережьем, что также препятствует росту экстремальности осадков.

4.1. Сравнение реанализов и эмпирических сеточных архивов данных по температуре и осадкам с данными станционных наблюдений

Проведен анализ климатических изменений на Черноморском побережье Кавказа (ЧПК) в последние десятилетия. Черноморское побережье Кавказа характеризуется значительной пространственно-временной неоднородностью гидрометеорологических величин. Сочетание особенностей синоптических процессов (близость средиземноморской ветви полярного фронта, влияние атлантических циклонов, азиатского антициклона и ультраполярных вторжений воздуха) с местными географическими особенностями региона (теплая поверхность Черного моря, горные вершины и ледники Большого Кавказа) приводит к формированию специфических метеорологических условий, благоприятствующих возникновению целого ряда опасных явлений погоды, значительная часть которых связана с выпадением сильных осадков. Поэтому изучение особенностей изменений климатических характеристик в этом густонаселенном и экономически важном регионе является крайне актуальной задачей.

При изучении особенностей режима температуры и осадков за основу были взяты суточные данные по температуре воздуха на 2 м и суточным суммам осадков на сетевых метеорологических станциях из архива ВНИИГМИ-МЦД [meteo.ru] (Табл. 4.1).

Для получения данных в свободной атмосфере и в регионах, слабо освещенных сетью постоянных метеорологических наблюдений, были использованы различные сеточные архивы данных: реанализ Era-Interim (European Interim ReAnalysis) [Dee et al., 2011], архивы глобального проекта климатических осадков GPCP [Adler et al., 2018] и CRU TS 4.06 (Climatic Research Unit) [Harris et al., 2020]. На основе этих данных был проведен анализ наблюдаемых изменений климата и проведена попытка физической интерпретации полученных результатов.

Анализ изменений климата традиционно начинается со статистических оценок приземной температуры воздуха и осадков. Наиболее точная информация об этих переменных получается из данных метеорологических наблюдений на станциях. Но в регионах со сложной орографией даже очень хорошо развитая метеорологическая сеть не всегда может дать полную информацию об особенностях климата.

Для построения ПКФ каждая отдельная станция принимается за начало координат, затем рассчитываются коэффициенты корреляции значений определенной метеорологической характеристики, измеренной на этой станции, с аналогичным

параметром на станциях, окружающих выбранное начало координат. В таком случае можно получить зависимость величины корреляции от расстояния (l) вдоль некоторого направления, которая и есть ПКФ:

$$r(l) = \frac{\sum_{l=1}^n X(n, l)X(n, 0)}{n\sigma_l\sigma_0} \quad (4.1)$$

где n – временной срез, σ_l , σ_0 – стандартные отклонения на двух станциях, $X(n, l)$, $X(n, 0)$ – значения метеорологической характеристики на станциях.

Если полученное поле изокоррелят представляет собой окружности с постепенным убыванием значений, то можно говорить, что поле изотропно. Если при изменении начальной станции поле изокоррелят не меняется, то данное поле также можно считать однородным. Но о свойствах изотропности и однородности полей метеорологических величин можно говорить только в пределах некоторой небольшой территории.

Также важным показателем при корреляционном анализе является радиус корреляции, т.е. максимальное расстояние, на котором статистическая связь между метеорологическими переменными перестает прослеживаться. Для среднемесячных температур воздуха на равнинных территориях установлено, что радиус корреляции составляет 1500-3000 км, при этом в летние месяцы корреляция уменьшается с увеличением расстояния быстрее, чем в зимние [Гандин, 1963; Исаев, 1988]. Из-за более высокой пространственной неоднородности среднемесячных сумм осадков, ПКФ уменьшается при удалении от станции значительно быстрее, радиусы корреляции для таких полей составляют всего 200-600 км на равнинах. В регионах со сложным рельефом значения перечисленных параметров находятся в сильной зависимости от орографических особенностей и обычно существенно ниже: даже для среднемесячных значений их величина, как правило, не превышает 50 км.

Рассмотрим особенности пространственно-корреляционной функции (ПКФ), построенной на основе данных метеорологических станций в Черноморско-Кавказском регионе (Рис. 4.1). Для температуры воздуха отмечается достаточно однородное строение поля ПКФ по данным метеорологических станций. Наименьшее значение коэффициента корреляции (0.51) получено между станциями Сулак и Таганрог, расстояние между этими станциями составляет 750 км, а перепад высот почти 2900 м. Поле осадков по аналогичным оценкам не имеет такой согласованной структуры в регионе, как поле температур, радиус значимых корреляций составляет не более 40 км.

Поэтому для получения более подробной картины климатических изменений в таком неоднородном регионе необходимо использовать дополнительные источники информации, такие как, например, реанализы и данные спутниковых наблюдений.

На структуру ПКФ температуры и осадков также оказывает влияние расположение станций относительно гор Кавказа. Например, для станции Красная поляна (Рис. 4.1 а, б) наибольшие значения корреляций соответствуют области побережья Черного моря и южных склонов гор, а для станции Кисловодск (Рис. 4.1 в, г) – северным предгорьям Кавказа.

Таблица 4.1. Основные характеристики метеорологических станций архива ВНИИГМИ-МЦД в исследуемом регионе

Индекс ВМО	Название станции	Долгота, °	Широта, °	Высота, м
34720	Таганрог	38.9	47.2	30
34730	Ростов-на-Дону	39.82	47.27	74
34824	Приморско-Ахтарск	38.15	46.03	3
34927	Краснодар, Круглик	39	45.05	28
34949	Ставрополь	42.08	45.12	451
37001	Анапа,МГ	37.3	44.9	30
37018	Туапсе	39.07	44.1	60
37031	Армавир	41.12	45	158
37054	Минеральные воды	43.07	44.23	315
37061	Буденновск	44.1	44.8	134
37099	Сочи	39.77	43.58	57
37107	Красная поляна	40.2	43.6	566
37112	Зеленчукская	41.57	43.87	928
37123	Кисловодск	42.72	43.9	943
37126	Шаджатмаз	42.67	43.73	2070
37196	Клухорский перевал	41.83	43.25	2037
37228	Владикавказ	44.7	43	702
37235	Грозный	45.7	43.35	162
37244	Гудермес	46.12	43.35	74
37461	Сулак	46.25	42.4	2927
37470	Дербент	48.3	42.1	-19
37471	Буйнакск	47.12	42.82	472
37472	Махачкала	47.48	43.01	-20

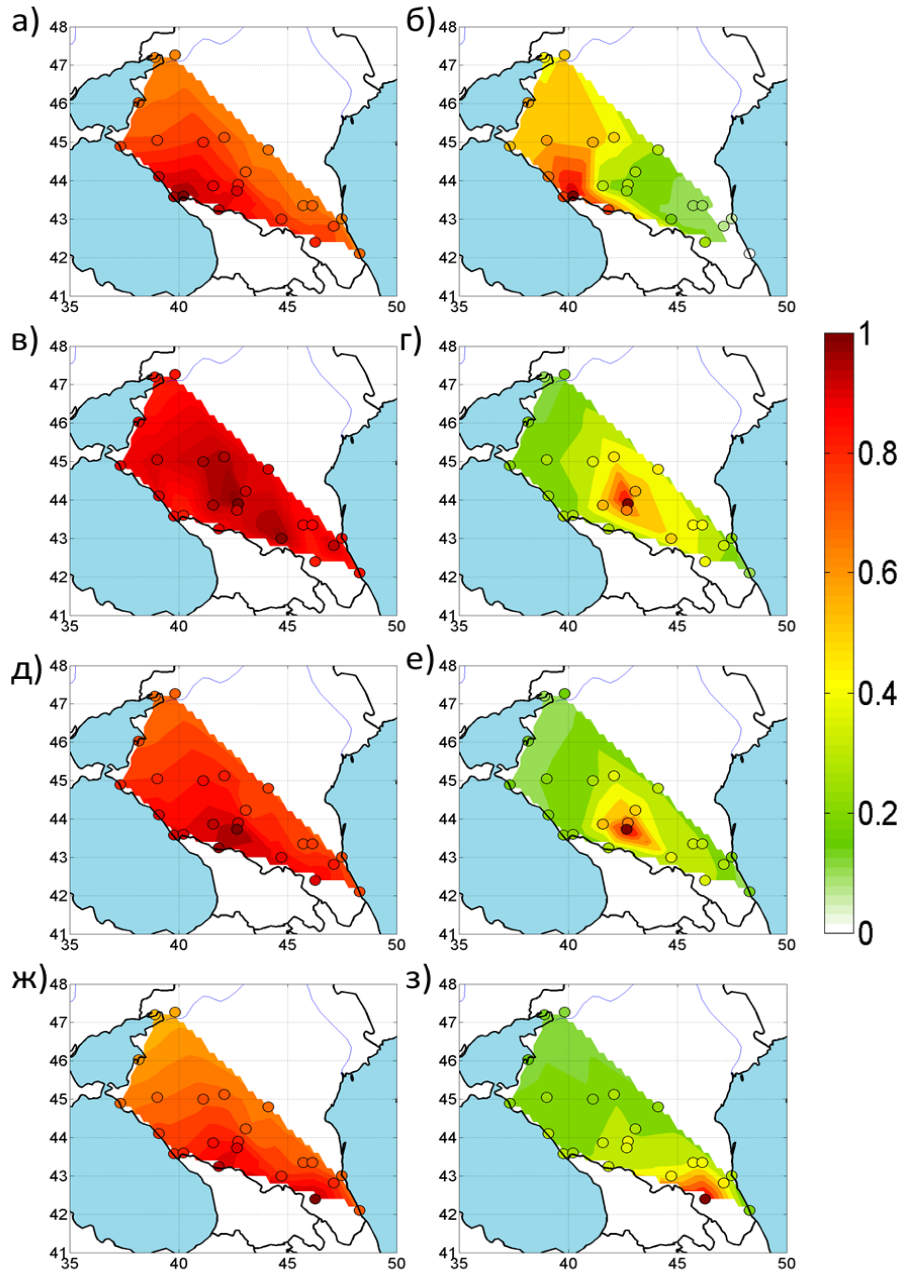


Рисунок 4.1. Значения ПКФ для среднемесячной температуры воздуха (слева) и сумм осадков за месяц (справа) относительно метеорологических станций: а, б – Красная поляна; в, г – Кисловодск, д, е – Шаджатмаз; ж, з – Сулак. Точками показано положение метеорологических станций. Аномалии рассчитаны относительно периода 1979-2018 гг.

Данные о приземной температуре и количестве осадков содержатся во всех современных реанализах, при этом в разных архивах одни и те же величины могут отличаться друг от друга из-за разного количества используемой информации, а также разных методов ее усвоения. Поэтому важным является вопрос сравнения информации, доступной по разным источникам данных.

Помимо оценок, проведенных на основе стационарных данных, был выполнен анализ тенденций, наблюдаемых по результатам реанализа ERA-Interim и другим сеточным архивам. Перед этим для установления степени согласованности используемой информации было проведено сравнение данных метеорологических станций и результатов билинейной интерполяции реанализа ERA-Interim. Сравнения проводились для данных о приземной температуре и количеству осадков. Стоит сказать, что подобные оценки при исследованиях проводятся достаточно часто при различных глобальных и региональных исследованиях [Hodges et al., 2011; Ward et al., 2011; Yin et al., 2004; Kharyutkina et al., 2022].

В качестве меры климатических изменений за выбранный период времени используется коэффициент линейного тренда, полученный по методу наименьших квадратов и характеризующий среднюю скорость изменений выбранных метеорологических параметров, а также значение вклада тренда в дисперсию. Анализ трендов проводился для среднемесячных и среднегодовых значений величин. Для стационарных данных были получены следующие характеристики экстремальности осадков: число дней за сезон с осадками выше 15 мм, 30 мм и 50 мм, максимальная суточная сумма осадков за сезон/год, а также повторяемость осадков выше 95%-го перцентиля функции распределения для периода 1981—2010 гг. и вклад таких осадков в общую сумму. Для всех трендов проводилась проверка значимости модели регрессии с использованием F-критерия Фишера с уровнем значимости 0.05.

Для рассматриваемого региона также была проведена оценка точности воспроизведения реанализами данных о температурном режиме и режиме осадков. Данные, содержащиеся в узлах регулярной сетки, были билинейно интерполированы в координаты точек метеорологических станций, использованных в работе. Далее проводилось сравнение результатов процедуры интерполяции с метеонаблюдениями, также проведено сравнение значений коэффициентов линейных трендов температуры и количества осадков по реанализу ERA-Interim, и архивам GPCP и CRU TS с соответствующими трендами на метеорологических станциях.

Между стационарными данными и реанализом ERA-Interim (Табл. 4.2) для среднемесячной температуры установлена высокая статистически значимая связь, коэффициенты корреляции для всех станций оказались выше 0.9. Средняя ошибка для большинства станций не выходит из диапазона $\pm 2^\circ\text{C}$, для высокогорных станций

Шаджатмаз, Клухорский перевал и Сулак средние ошибки составляют 3.5, 3.1 и 7.2°C соответственно, что подтверждает факт необходимости учета особенностей рельефа при работе с данными реанализов в регионах со сложной орографией. На величину средней ошибки в первую очередь влияет разность реальной высоты станции над уровнем моря и высоты модельной точки. Впрочем, для среднемесячных значений эта ошибка может быть устранена с использованием температурного градиента стандартной атмосферы (- 0.65°/100 м). Однако, для других метеорологических величин, в частности, для осадков, введение строгой физически обоснованной поправки неочевидно. Средняя разность в значениях трендов среднегодовой температуры для ERA-Interim составила 0.08°C/10 лет, что составляет не более 15% от средней величины тренда в регионе. Аналогичные оценки были получены для температуры по CRU TS (Прил. 12). Значения трендов температуры по данным архива хорошо соотносятся с фактическими величинами по данным станций во все сезоны года, кроме зимы, когда средняя ошибка в значениях коэффициентов линейного тренда в среднем составляет 50% от его значения.

Таким образом, реанализ ERA-Interim для температуры показал высокую степень согласованности с результатами метеорологических наблюдений для среднемесячных данных, что позволяет использовать его для анализа климатических трендов и средних значений. Данные CRU TS также неплохо отражают основные особенности температурного режима, но при анализе трендов могут наблюдаться значительные расхождения, особенно в зимний сезон.

В результате сравнения данных по среднемесячным суммам осадков с реанализом ERA-Interim (Табл. 4.3), статистически значимые коэффициенты корреляции (для данной выборки пороговое значение составило 0.39 при уровне значимости 0.05) были получены для большей части станций. При этом стоит отметить, что при изучении связей метеорологических величин за значимый коэффициент корреляции обычно принимают значения более 0.6-0.7 [Исаев, 1988]. Для всех станций средняя ошибка реанализа имеет величину, сопоставимую с наблюдаемыми значениями количества осадков, что говорит о низком качестве данных по осадкам в реанализе.

При проведении аналогичных сравнений для архива среднемесячных сумм осадков CRU TS и данных GPCP (Прил. 13, 14) также получены статистически значимые коэффициенты корреляции в большинстве случаев, но величины средних ошибок и

различия в значениях коэффициентов линейных трендов (в некоторых случаях даже по знаку), говорит о плохой согласованности рядов.

Таблица 4.2. Результаты сравнения среднемесячных значений температуры по реанализу ERA-Interim с метеостанциями в 1979-2018 гг. (R – коэффициент корреляции, RMS – среднеквадратическое отклонение, Δ – разница между результатом интерполяции и станционными данными, β – коэффициент линейного тренда по реанализу ERA-Interim). Жирным шрифтом выделены тренды, значимые на уровне 0.05.

Станции	R	Δ , °C	RMS (Δ), °C	β , °C/10 лет				
				Год	Зима	Весна	Лето	Осень
Таганрог	0.999	-0.30	0.44	0.61	0.37	0.63	0.87	0.55
Ростов-на-Дону	0.999	0.02	0.41	0.61	0.40	0.63	0.87	0.54
Приморско-Ахтарск	0.999	0.10	0.43	0.54	0.22	0.55	0.87	0.50
Краснодар, Круглик	0.999	-0.23	0.37	0.58	0.40	0.55	0.80	0.56
Ставрополь	0.999	0.74	0.47	0.45	0.35	0.41	0.65	0.40
Анапа, МГ	0.998	0.12	0.66	0.54	0.27	0.53	0.83	0.52
Туапсе	0.996	-1.74	0.98	0.51	0.36	0.44	0.70	0.54
Армавир	0.999	-0.32	0.45	0.46	0.36	0.39	0.64	0.44
Минеральные воды	0.999	-0.99	0.81	0.43	0.39	0.42	0.54	0.35
Буденновск	0.999	0.02	0.40	0.45	0.29	0.50	0.67	0.37
Сочи	0.998	-1.44	0.54	0.45	0.30	0.32	0.68	0.48
Красная поляна	0.996	-0.07	0.66	0.40	0.31	0.27	0.59	0.45
Зеленчукская	0.997	-0.14	0.63	0.36	0.33	0.26	0.49	0.37
Кисловодск	0.998	-0.93	0.69	0.38	0.37	0.35	0.48	0.33
Шаджатмаз	0.987	3.54	2.00	0.37	0.36	0.32	0.46	0.32
Клухорский перевал	0.996	3.14	1.00	0.35	0.29	0.24	0.52	0.36
Владикавказ	0.997	-1.76	0.69	0.42	0.39	0.39	0.52	0.38
Сулак	0.986	7.18	1.94	0.48	0.56	0.39	0.57	0.39
Гудермес	0.997	-1.52	1.01	0.49	0.50	0.44	0.58	0.44
Дербент	0.995	-2.50	0.86	0.47	0.50	0.44	0.57	0.36
Буйнакск	0.998	-1.92	0.75	0.46	0.52	0.38	0.55	0.40
Буйнакск	0.998	-1.92	0.75	0.46	0.52	0.38	0.55	0.40
Махачкала	0.996	-1.68	0.93	0.47	0.41	0.49	0.59	0.39

Данные результаты подтверждают факт низкого качества воспроизведения осадков большинством источников данных и вынуждает при количественных оценках использовать метеорологические станции, а сеточные архивы рассматривать как источник дополнительной информации о вероятных тенденциях для регионов, в которых отсутствуют более качественные данные.

Также стоит отметить, что при использовании любых сеточных архивов существуют ошибки, связанные с процедурой интерполяции, и невозможно получить идеальной согласованности ренализов и станционных данных. Поэтому при анализе сеточных архивов часто рассматривают общую пространственную структуру и ее изменение, а не конкретные значения в точках.

Таблица 4.3. Результаты сравнения среднемесячных значений сумм осадков (мм/день) реанализа ERA-Interim с метеостанциями в 1979-2018 гг. (R – коэффициент корреляции, RMS – среднеквадратическое отклонение, Δ – разница между результатом интерполяции и станционными данными, β – коэффициент линейного тренда по реанализу ERA-Interim). Жирным шрифтом выделены тренды, значимые на уровне 0.05.

Станции	R	Δ , мм	RMS (Δ), мм	β , мм/10 лет				
				Год	Зима	Весна	Лето	Осень
Таганрог	0.79	-0.21	0.64	-0.04	-0.04	0.01	-0.12	-0.02
Ростов-на-Дону	0.80	-0.29	0.65	-0.05	-0.03	-0.01	-0.13	-0.02
Приморско-Ахтарск	0.76	-0.17	0.69	-0.05	-0.06	0.02	-0.06	-0.09
Краснодар, Круглик	0.78	-0.26	0.79	-0.02	-0.02	0.05	-0.09	-0.01
Ставрополь	0.79	0.14	0.68	-0.04	0.01	0.06	-0.21	-0.01
Анапа, МГ	0.69	-0.26	0.84	-0.03	-0.06	0.01	-0.05	-0.04
Туапсе	0.72	-1.78	1.93	0.03	-0.04	0.06	0.00	0.08
Армавир	0.78	0.19	0.78	-0.04	0.00	0.06	-0.23	0.00
Минеральные воды	0.70	1.11	1.03	-0.09	0.01	0.01	-0.42	0.01
Буденновск	0.66	0.18	0.63	-0.05	0.02	-0.01	-0.23	0.00
Сочи	0.76	-2.30	2.00	0.07	-0.04	0.07	0.10	0.16
Красная поляна	0.80	-2.26	2.25	0.05	-0.06	0.06	0.04	0.15
Зеленчукская	0.70	1.22	1.27	-0.05	-0.03	0.00	-0.24	0.05
Кисловодск	0.80	1.14	1.02	-0.11	0.00	-0.01	-0.42	-0.01
Шаджатмаз	0.80	1.46	1.04	-0.12	-0.01	-0.03	-0.41	-0.02
Клухорский перевал	0.49	-1.50	2.56	-0.05	-0.09	0.00	-0.17	0.05
Владикавказ	0.74	0.35	1.50	-0.28	-0.06	-0.21	-0.71	-0.16
Грозный	0.55	1.19	1.40	-0.24	-0.05	-0.14	-0.60	-0.19
Гудермес	0.49	0.99	1.28	-0.22	-0.04	-0.12	-0.51	-0.20
Сулак	0.78	-0.06	1.19	-0.24	-0.07	-0.11	-0.57	-0.22
Дербент	0.34	0.68	1.13	-0.17	-0.01	-0.12	-0.34	-0.21
Буйнакск	0.69	1.33	1.23	-0.24	-0.04	-0.08	-0.55	-0.29
Махачкала	0.28	0.87	1.22	-0.18	-0.02	-0.11	-0.37	-0.24

4.2. Наблюдаемые изменения температурно-влажностного режима Черноморского побережья Кавказа³

Черноморское побережье Кавказа (ЧПК) отличается большой пространственно-временной неоднородностью метеорологических величин. Сочетание особенностей крупномасштабной циркуляции с местными орографическими особенностями региона приводит к формированию мезомасштабных процессов, благоприятствующих возникновению целого ряда опасных явлений погоды.

Северо-восточная часть побережья Черного моря характеризуется высокой повторяемостью экстремальных метеорологических событий. Например, в 2017 году на территории России было зафиксировано 166 опасных гидрометеорологических явлений, связанных с выпадением осадков (ливни, снегопады, град), нанесших социальные и экономические потери, при этом 18 из них произошло в Краснодарском крае в теплое время года, что составляет более 10% всех случаев по стране [Коршунов, Шаймарданов, 2007]. Экстремальные осадки также являются главной причиной возникновения других опасных явлений (паводки, половодья, наводнения, сели и оползни), наносящих огромный ущерб объектам экономики.

На (Рис. 4.2) представлены карты коэффициентов линейного тренда температуры воздуха на уровне 2 м для всех сезонов года в Черноморском регионе и на Кавказе по данным метеорологических станций и реанализа ERA-Interim.

По стационарным данным средняя скорость потепления на равнинах и в предгорьях Кавказа в 1979-2018 гг. летом составила 0.7 ± 0.2 °C/10 лет, в горных районах порядка 0.5 ± 0.1 °C/10 лет. Наибольшие темпы потепления получены для летнего сезона на станциях северо-восточного побережья Черного моря (Таганрог, Туапсе, Анапа, Краснодар) и для предгорий Кавказа (Буденновск, Владикавказ, Ставрополь), где коэффициенты линейного тренда превышают 1°C/10 лет. Над морями и горными территориями в теплое время года значения трендов в 1,5-2 раза ниже (0.5 ± 0.1 °C/10 лет),

³ Разделы 4.2 и 4.3 подготовлен на основе статей:

Торопов П. А., Алешина М. А., Семенов В. А. Тенденции изменений климата Черноморско-Каспийского региона за последние 30 лет //Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2018. — № 2. — С. 67–77.

Алешина М. А., Торопов П. А., Семенов В. А. Изменение температурно-влажностного режима Черноморского побережья Кавказа в период 1982-2014 гг. //Метеорология и гидрология. — 2018. — № 4. — С. 41–53.

чем над сушей. Зимой статистически значимое потепление за последние десятилетия наблюдалось только на Восточном Кавказе (станции Красная поляна, Шаджатмаз, Владикавказ и Сулак). Все перечисленные особенности хорошо соотносятся с полями коэффициентов линейных трендов, полученных по реанализу ERA – Interim (Табл. 4.2).

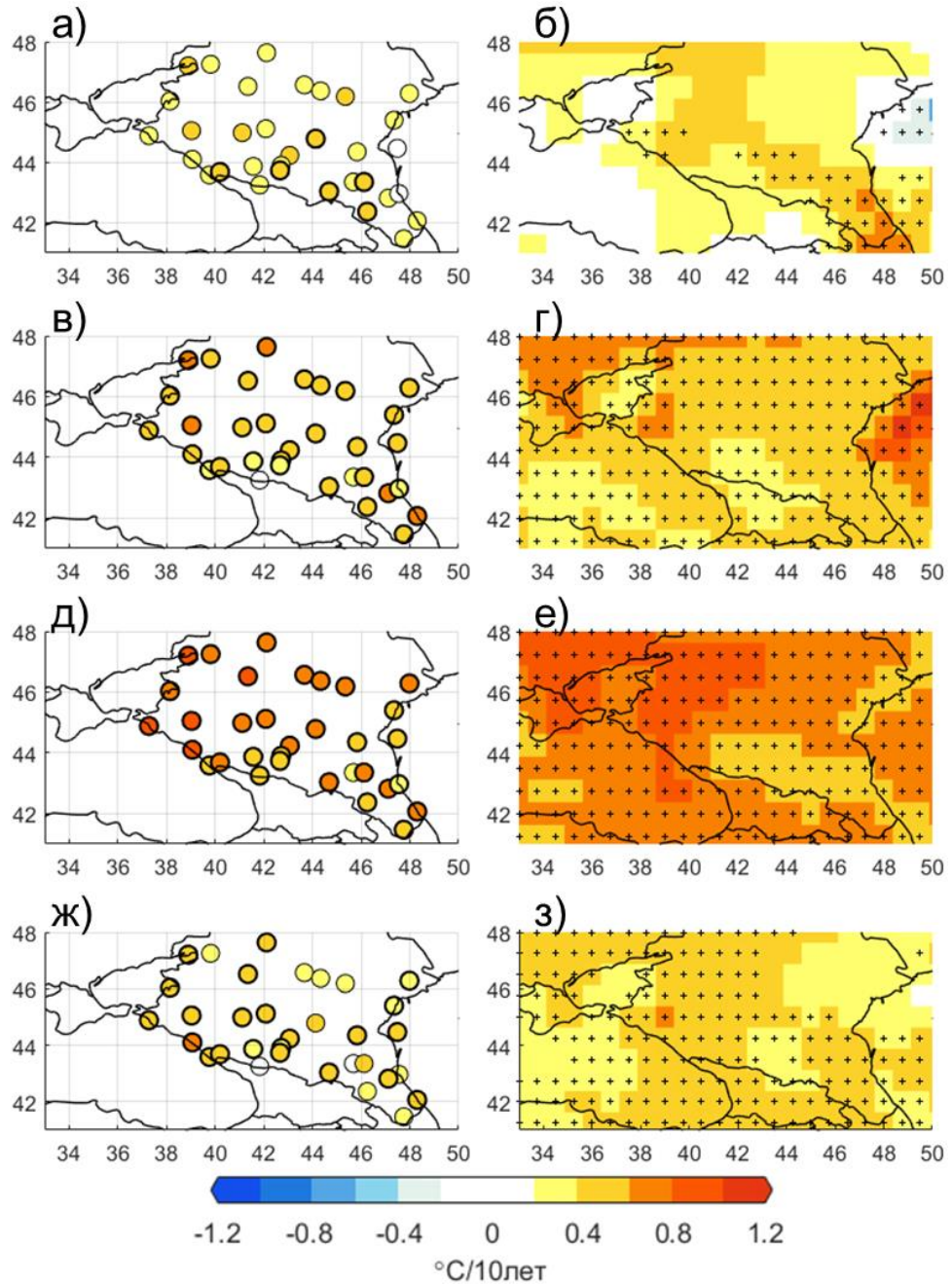


Рисунок 4.2. Коэффициенты линейного тренда температуры воздуха на 2 м (в $^{\circ}\text{C}/10$ лет) по метеорологическим станциям (а, в, д, ж) и реанализу ERA-Interim (б, г, е, з) за период 1979-2018 гг. для зимы (а, б), весны (в, г), лета (д, е) и осени (ж, з). Жирными контурами показаны станции, тренды на которых статистически значимы на уровне 0.05. Статистически значимые на уровне 0.05 тренды показаны жирными контурами для станций и штриховкой для реанализа.

Помимо статистического анализа приземной температуры были выполнены оценки изменений термического режима свободной атмосферы. Интерес к этому связан с гипотезой об общем уменьшении статической устойчивости тропосферы при глобальном потеплении [Мохов, Акперов, 2006]. На основе реанализа ERA-Interim были проанализированы данные о темпах изменения температуры на разных изобарических уровнях. Для сравнения были выделены четыре области, по контурам которых проводилось пространственное осреднение значений температуры: северо-восток и юго-восток Черного моря, а также Западный и Восточный Кавказ (Рис. 4.3).

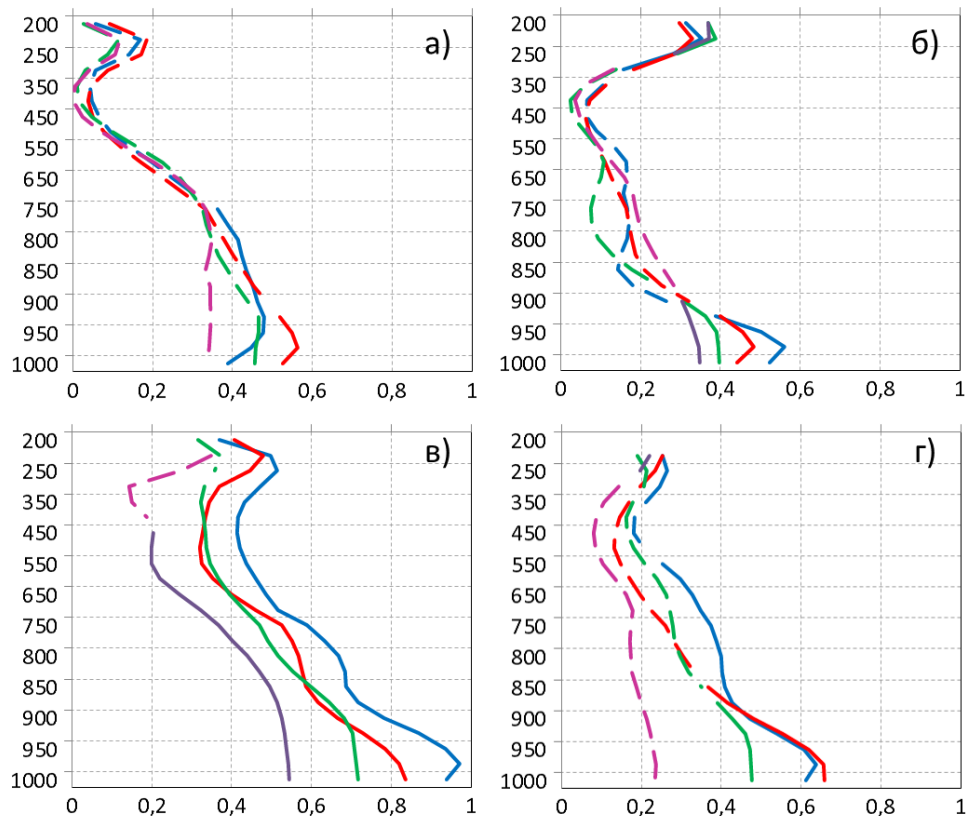


Рисунок 4.3. Вертикальные профили значений коэффициентов линейных трендов температуры (в $^{\circ}\text{C}/10$ лет) на изобарических поверхностях по данным реанализа ERA - Interim в 1979-2018 гг. для регионов северо-востока (Регион 1, синяя кривая), юго-востока (Регион 2, красная кривая) Черного моря, Западного (Регион 3, зеленая кривая) и Восточного (Регион 4, фиолетовая кривая) Кавказа зимой (а), весной (б), летом (в) и осенью (г). Статистически значимые на уровне 0.05 тренды показаны непрерывными линиями.

Во всех выделенных регионах наблюдается повышение температуры в тропосфере, причем летом потепление выражено ярче. Так, значимые коэффициенты линейных

трендов для лета над выбранными регионами изменяются от $1^{\circ}/10$ лет у поверхности до $0.2-0.5^{\circ}/10$ лет на уровнях 250-450 гПа. Прогрев всей толщи тропосферы может потенциально приводить к увеличению влагосодержания атмосферы и доступной потенциальной конвективной энергии в регионе. Зимой и весной изменения температуры в атмосфере составляют от 0.8 до $0.4^{\circ}/10$ лет и отмечаются лишь в нижней тропосфере до уровня около 900 гПа, для северо-восточной части Черного моря зимой до уровня 750 гПа.

Таким образом, как по стационарным данным, так и по реанализу ERA-Interim в регионе наблюдается значимое повышение температуры у поверхности и в тропосфере, ярче всего выраженное в теплое время года (особенно летом) над сушей. Для горных территорий темпы потепления ниже, чем для предгорий Кавказа и морских побережий, при этом в зимнее время года повышение температуры в горах выражено ярче, чем над всеми остальными исследуемыми районами.

Для сравнения пространственной структуры на (Рис. 4.4) показано распределение коэффициентов линейных трендов суточной интенсивности осадков для реанализа ERA - Interim, а также архивов CRU TS и GPCP для летнего и зимнего сезонов. На (Рис. 4.5) также приведены тренды сезонных сумм осадков по данным метеорологических станций и реанализа ERA - Interim.

Как видно из приведенных рисунков, сеточные архивы не всегда хорошо соотносятся с фактической картиной изменений режима осадков. При этом в полученных полях не все пространственные особенности отражены одинаково. Например, по реанализу ERA - Interim летом над Кавказом располагается достаточно обширная область со значимыми отрицательными трендами количества осадков, тогда как по данным GPCP этой области соответствуют лишь слабо отрицательные тренды, а в архиве CRU TS и вовсе для Закавказья получены положительные (не все равно статистически незначимые) тренды осадков. Как уже было отмечено ранее, данные результаты подтверждают факт достаточно низкого качества воспроизведения осадков большинством реанализов, и вынуждает сеточные архивы рассматривать лишь как источник дополнительной информации о пространственной структуре рассматриваемых величин и их вероятных тенденциях для регионов, в которых отсутствуют более качественные данные.

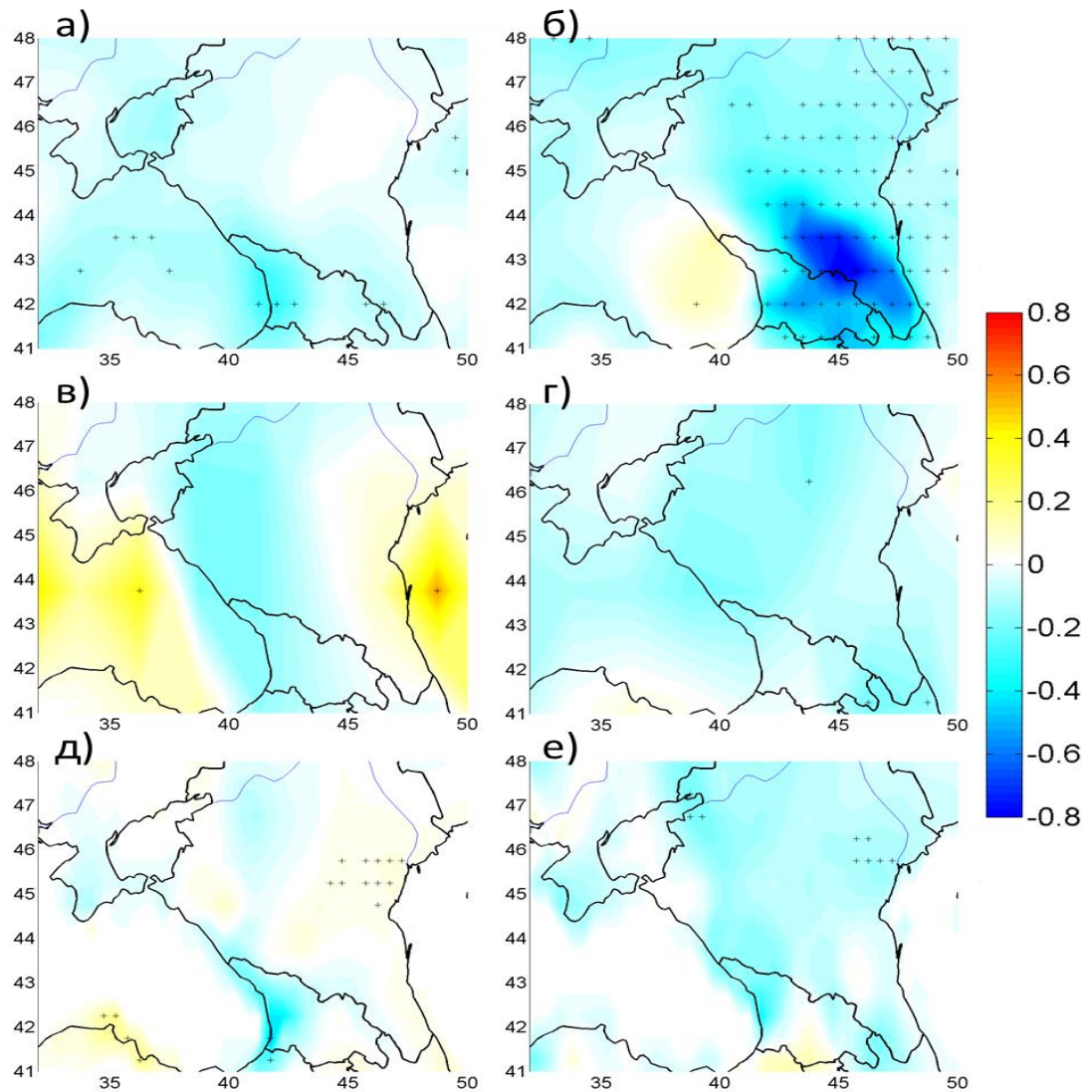


Рисунок 4.4. Коэффициенты линейных трендов суточной интенсивности осадков (в [мм/день]/10 лет) по данным ERA-Interim (а, б), GPCP (в, г), CRU TS (д, е) в 1979 - 2018 гг. зимой (а, в, д) и летом (б, г, е). Статистически значимые на уровне 0.05 тренды показаны штриховкой. Для архива CRU TS данные над морями отсутствуют.

Анализ сезонных сумм осадков на юге ЕТР (Рис. 4.5) не позволяет выделить однозначных тенденций. Зимой и весной увеличение сезонных сумм осадков на 12 - 15%/10 лет отмечено в Дагестане, Калмыкии и Астраханской области, в то время как на побережье Черного моря тренды статистически не значимы и составляют менее 3 - 6%/10 лет. Летом на станциях преобладают статистически не значимые отрицательные тренды сезонных сумм осадков порядка -3-9%/10 лет, при этом по данным реанализа ERA-Interim уменьшение осадков выражено сильнее, тренд составляет - 12 - 18%/10 лет с наименьшими значениями в дельте Волги.

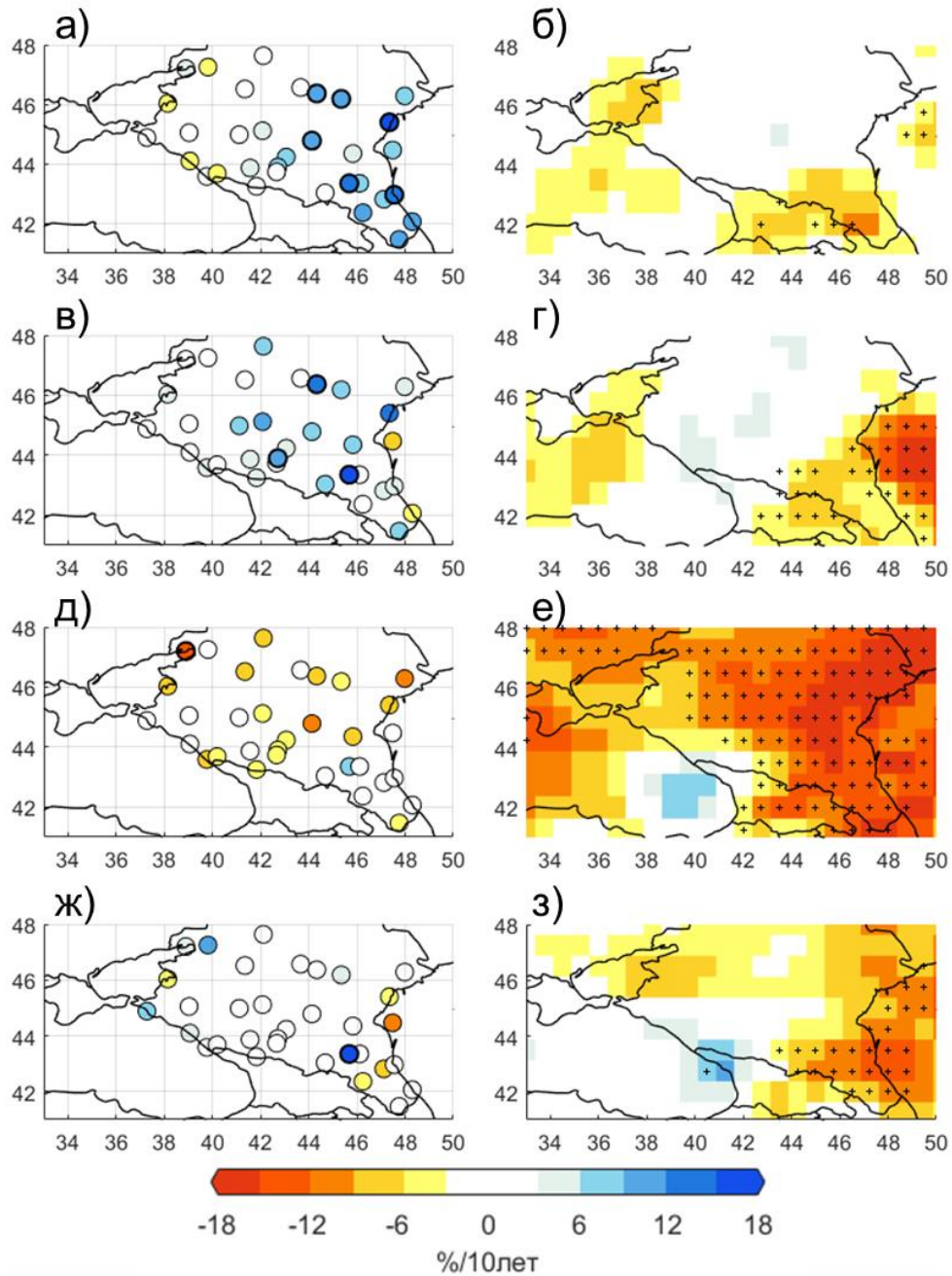


Рисунок 4.5. Коэффициенты линейного тренда сезонных сумм осадков (в %/10 лет от средних в 1981-2010 гг.) по метеорологическим станциям (а, в, д, ж) и реанализу ERA - Interim (б, г, е, з) за период 1979-2018 гг. для зимы (а, б), весны (в, г), лета (д, е) и осени (ж, з). Статистически значимые на уровне 0.05 тренды показаны жирными контурами для станций и штриховкой для реанализа.

Сезонные оценки могут давать противоречивые результаты при условии разнонаправленных тенденций в разные месяцы. На (Рис. 4.6) представлен годовой ход средних за месяц значений суточных сумм осадков за дни с осадками, для краткости далее называемые «интенсивностью», а также среднемесячные суммы осадков и значения трендов этих величин для станций на Черноморском побережье Кавказа. Для всего года

в регионе характерны слабые и умеренные осадки со средней интенсивностью 2 - 5 мм/сутки, для предгорных условий (Красная поляна) интенсивность осадков в среднем выше и составляет 10-12 мм/сутки, что объясняется динамическим воздействием рельефа. Для выбранных станций максимальные значения сезонных сумм осадков характерны для холодного полугодия.

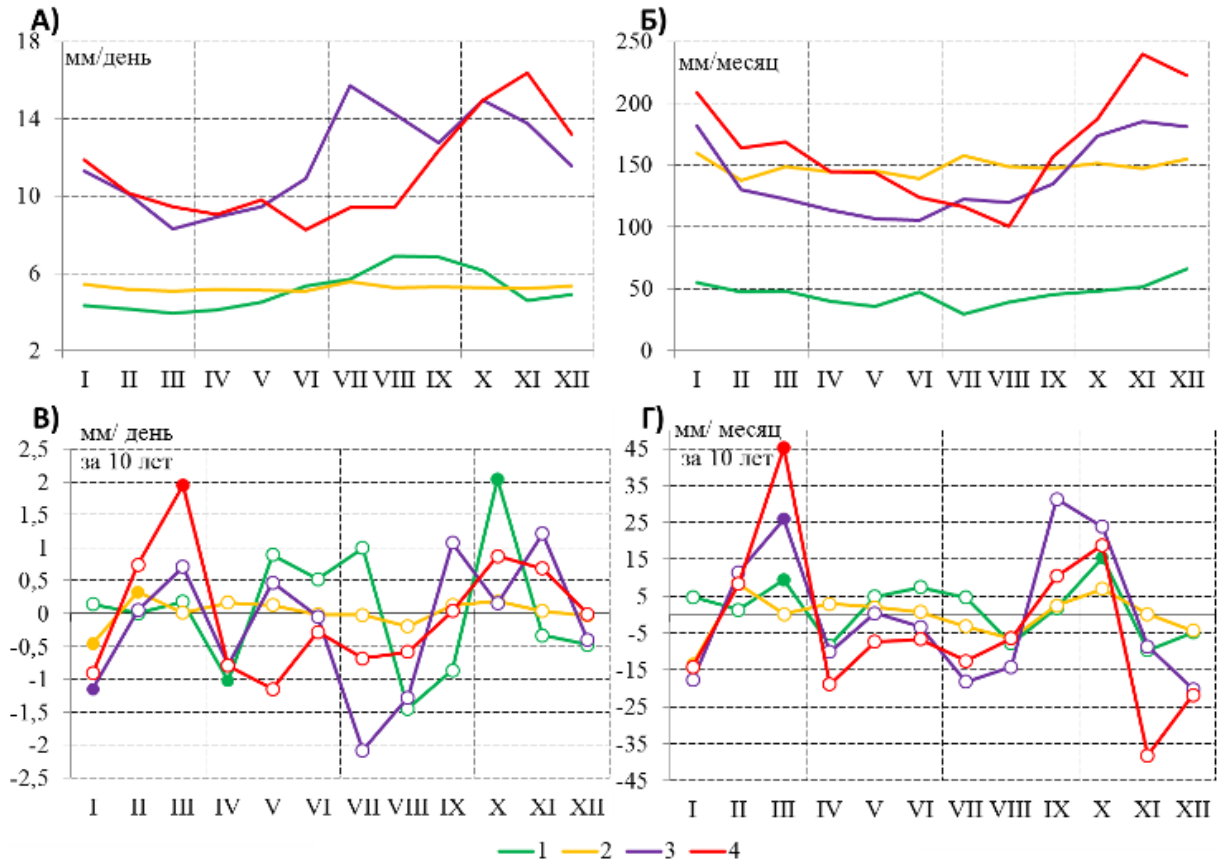


Рисунок 4.6. Годовой ход среднемесячной интенсивности осадков (а), месячных сумм осадков (б), коэффициентов трендов для среднемесячной интенсивности осадков (в) и месячных сумм осадков (г) в 1979-2018 гг. на метеорологических станциях (зеленая кривая – Анапа, желтая кривая – Туапсе, фиолетовая кривая – Сочи, красная кривая – Красная поляна), статистически значимые на уровне 0.05 тренды показаны закрашенными точками.

При анализе данных по тенденциям интенсивности и суммам осадков за месяц видно, что значимые тренды на станциях наблюдаются лишь в отдельные месяцы, причем в течение года значения трендов могут быть как положительными, так и отрицательными. Поэтому в целом нельзя сделать вывод о значимых изменениях сумм и интенсивности осадков. Можно лишь отметить слабую тенденцию снижения увлажнения на станциях

побережья ЧПК с июля по сентябрь, и слабовыраженную тенденцию к увеличению осадков в феврале-марте и сентябре – октябре.

Помимо средних значений осадков, был проведен анализ трендов характеристик экстремальных осадков. На (Рис. 4.7) показаны результаты расчета трендов суточной интенсивности осадков, вклада экстремальных осадков в сезонную сумму (экстремальными считались осадки выше 95%-го перцентиля эмпирической функции распределения осадков) и максимальных суточных значений осадков за сезон.

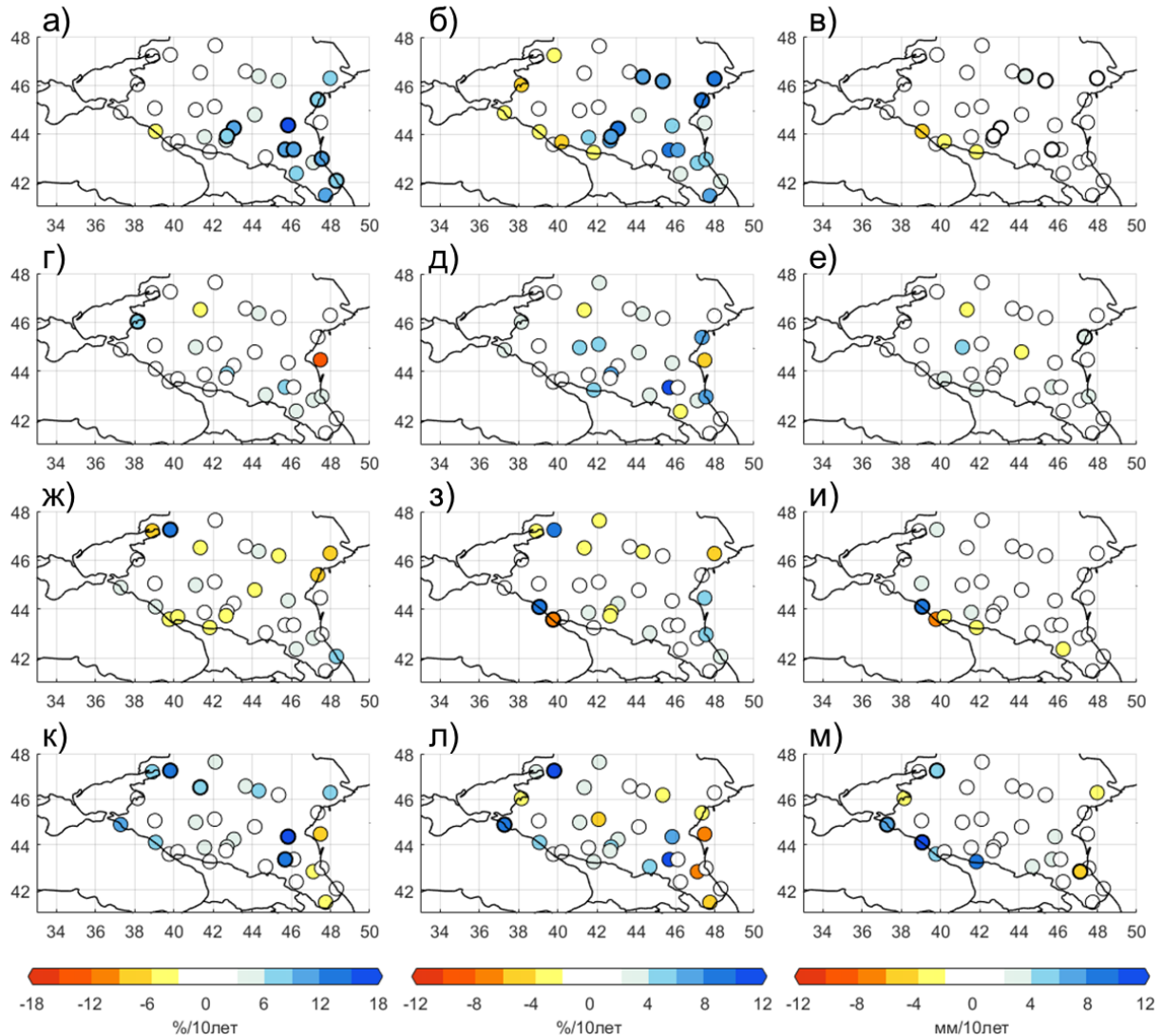


Рисунок 4.7. Коэффициенты линейных трендов суточной интенсивности осадков (а, г, ж, к, в $\%/10$ лет от средних в 1981-2010 гг.), вклада экстремальных осадков в сезонную сумму (б, д, з, л, в $\%/10$ лет) и максимальных за сезон суточных сумм осадков (в, е, и, м, в мм/день/10 лет) на метеостанциях в 1979-2018 гг. зимой (а-в), весной (г-е), летом (ж-и) и осенью (к-м). Статистически значимые на уровне 0.05 тренды показаны жирными контурами.

Зимой на Восточном Кавказе и в нижнем Поволжье преобладает увеличение интенсивности осадков (на 6-18%/10 лет), а также вклада экстремальных осадков в общую сумму (6 - 12%/10 лет), что также согласуется с увеличением сезонных сумм осадков. Для весны, лета и осени тренды данных величин преимущественно статистически не значимы. Осенью можно отметить слабое увеличение интенсивности осадков и вклада экстремальных осадков в сумму для побережья ЧПК и региона Кавказских Минеральных Вод (КМВ), также на побережье ЧПК получено увеличение сезонных максимумов осадков.

Тренды повторяемости осадков выше 15, 30 и 50 мм/день приведены в (Прил. 15). Большинство полученных трендов являются статистически не значимыми – можно говорить лишь о слабой тенденции того или иного знака. Для зимнего сезона отмечено статистически не значимое уменьшение повторяемости выбранных характеристик для станций Черноморского побережья Кавказа, на метеостанции Красная поляна уменьшение частоты осадков выше 30 и 50 мм/день является статистически значимым и составляет более 0.6-0.8 дней/сезон/10 лет. Летом получено небольшое уменьшение частоты осадков более 15 мм/день на ЧПК, Центральном Кавказе и в регионе КМВ (до 0.6 дней/сезон/10 лет).

Как уже было отмечено ранее, на неустойчивость трендов могут оказывать влияние внутрисезонные различия в наблюдаемых тенденциях, что и было показано на примере станций ЧПК на (Рис. 4.6). Однако, также важно учитывать межгодовые вариации исследуемых значений. На (Рис. 4.8) приведены скользящие 30-летние значения трендов средней температуры, интенсивности осадков и повторяемости экстремальных осадков для станций юга ЕТР с использованием стационарных данных за период 1966-2022 гг. Зимой устойчивое увеличение температуры отмечается начиная с 1980-х гг., когда темпы повышения температуры на всех станциях региона составляли более 0.4°C/10 лет. Для летнего сезона увеличение температуры зафиксировано раньше, с 1970-х гг.

По сравнению с трендами среднесезонной температуры, тренды осадков отличаются значительной амплитудой значений. На отдельных станциях в разные периоды расчета трендов отмечались тенденции разного знака, хотя большинство полученных значений трендов статистически не значимо (как и в современный период).

Объединяя данные, полученные из анализа разных характеристик режима осадков, можно обобщить, что для зимнего сезона в регионе более характерна тенденция к

уменьшению осадков (как средних, так и экстремальных значений) на ЧПК и слабое увеличение на Восточном Кавказе и в нижнем Поволжье.

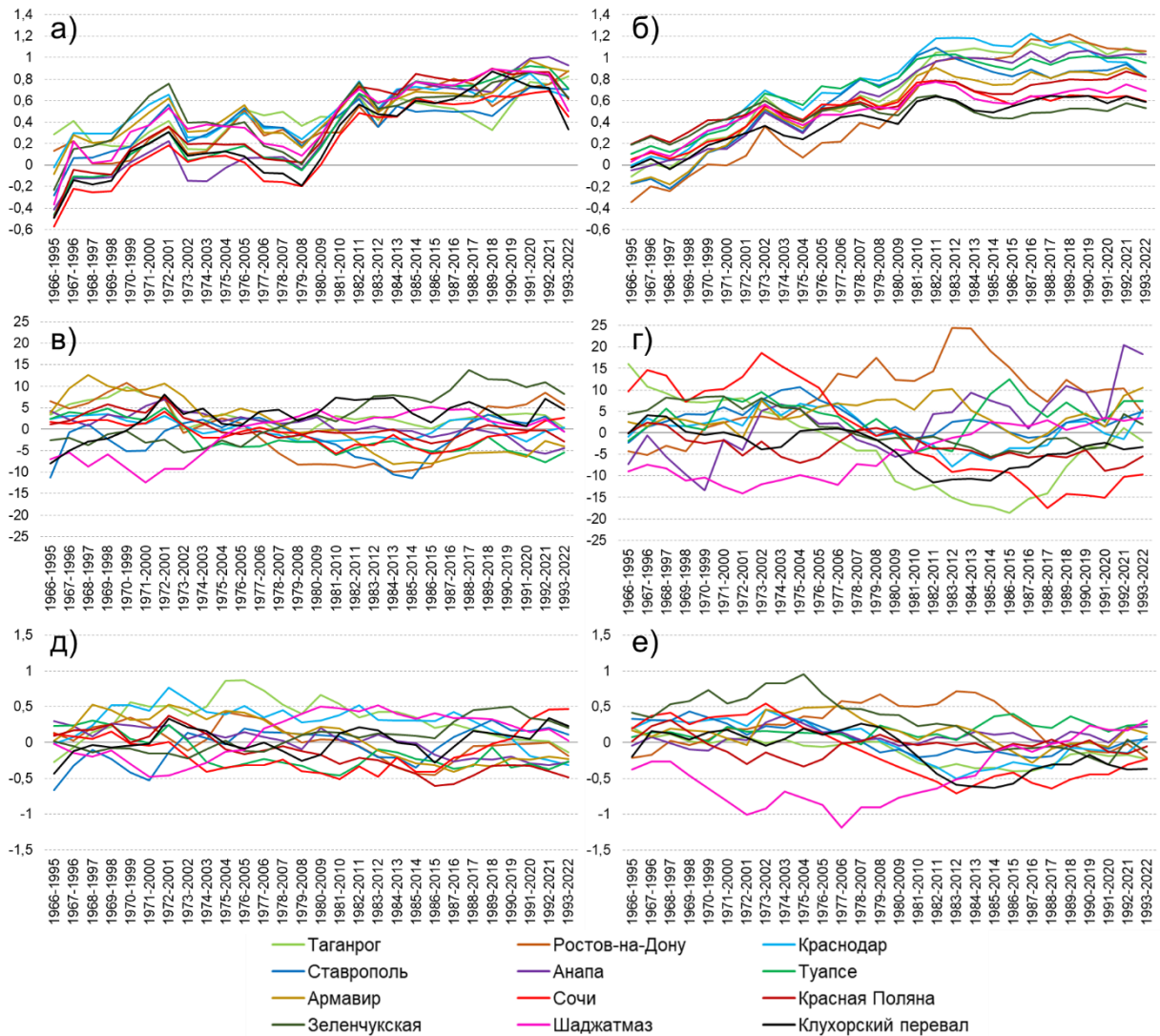


Рисунок 4.8. Скользящие коэффициенты линейных трендов 30-летних периодов для средних температур (а, б, °C/10 лет), интенсивности осадков (в, г, %/10 лет относительно 1981-2010 гг.), повторяемости экстремальных осадков выше 95%-го percentиля в 1981-2010 гг. (д, е в дн./сезон/10 лет) зимой (а, в, д) и летом (б, г, е).

Для летнего сезона вероятно происходит слабое уменьшение осадков практически на всей исследуемой области. Но в целом нельзя сделать вывод о значимых однонаправленных изменениях режима осадков в регионе. Статистически значимые тренды могут быть отмечены лишь для отдельных месяцев в году и не для всех характеристик. Также отмечается, что разнонаправленные тенденции осадков характерны не только для последних трех десятилетий, но и для периода 1966-2022 гг., что обусловлено сильной межгодовой изменчивостью характеристик осадков в регионе.

4.3. Анализ физических процессов, определяющих изменения температурно - влажностного режима Черноморско-Кавказского региона

Анализ физических механизмов наблюдаемых изменений климата на Черноморском побережье Кавказа проводился с использованием полукачественного анализа компонент уравнения притока тепла, согласно которому изменение температуры определяется ее горизонтальной адвекцией, процессами динамического оседания/подъема воздуха, величиной турбулентного притока тепла и притоками тепла из других источников. Вклад некоторых компонент в наблюдаемое потепление климата региона был оценен с помощью переменных, представленных в реанализе ERA-Interim.

Интерпретация полученных результатов требует анализа динамики таких величин, как интегральное содержание влаги в атмосфере, дивергенции влаги, а также доступной конвективной потенциальной энергии (CAPE), характеризующей потенциально возможную интенсивность конвективных движений [Moncrieff and Miller, 1976].

В исследуемом регионе максимальные значения величины CAPE и интегрального влагосодержания (Рис. 4.9 а, б) наблюдаются в летний период, когда воздух содержит в себе много влаги и у поверхности наблюдается неустойчивая стратификация. При анализе карт коэффициентов линейных трендов таких величин, как CAPE и влагосодержание столба атмосферы, было установлено, что наиболее заметные изменения в 1979-2018 гг. можно отметить преимущественно для летнего сезона (Рис. 4.9 в, г). Например, для значений CAPE в центральной части Черного моря коэффициент линейного тренда для зимы составил 1,8 Дж/кг за 10 лет, а для лета 126 Дж/кг за 10 лет. Получено, что за 30 лет значения CAPE для данного региона увеличились более чем в три раза (с 180 Дж/кг в 1979 году до 590 Дж/кг в 2018 году). Для влагосодержания в юго-восточной части Черного моря аналогичный показатель тренда для зимы оказался незначимым, а для лета составил 0,6 кг/м² за 10 лет. В целом это согласуется с гипотезой о важном вкладе в глобальные изменения климата летних вариаций температуры, определяющих интенсивность парникового эффекта из-за обратной связи с водяным паром [Кислов, 2001].

Конвективная доступная потенциальная энергия (CAPE) является важным показателем неустойчивости атмосферы. Как было показано ранее (Рис. 4.3), в верхней тропосфере темпы потепления ниже, чем у поверхности. В связи с этим средняя конвективная неустойчивость, а значит и CAPE, может увеличиваться со временем.

Максимальный рост CAPE отмечается в юго-восточной части Черного моря (Рис. 4.9 в), для которой также характерны высокие температуры поверхности моря и максимальные для этого региона значения CAPE. Величину CAPE часто используют как характеристику грозовой активности в регионе. Но также можно предположить, что сильное увеличение энергии, которая может влиять на интенсивность процессов конвекции, должно отразиться и на режиме осадков. Но, как было показано ранее, существенных изменений ни в среднем режиме осадков, ни в частоте экстремальных событий, обнаружено не было. Из этого можно предположить, что изменение режима осадков управляется не только повышением температуры в регионе, но и другими факторами. Этот эффект также требует объяснения.

Используя данные о величинах удельной влажности и трендах температуры на разных изобарических поверхностях, можно оценить, насколько повышение температуры в исследуемом регионе должно повлиять на изменение влагосодержания атмосферного столба и, возможно, на режим осадков. Согласно уравнению Клаузиуса-Клапейрона, рост температуры всей толщи тропосферы на 1°C приводит к увеличению ее влагосодержания примерно на 7% [Min et al., 2011]. Сравнивая полученный результат с фактическими данными (Рис. 4.9 д) можно заключить, что в регионе темпы роста влагосодержания не согласуются с изменениями, ожидаемыми исключительно за счет термодинамического эффекта. По данным реанализа увеличение влагосодержания за период 1979-2018 гг. оказалось на 5-15% меньше, чем рассчитанное по уравнению Клаузиуса-Клапейрона. Это указывает на значительную роль динамического/циркуляционного фактора, который, по-видимому, сдерживает эффект локального увеличения влагосодержания.

Летом также отмечен положительный тренд дивергенции влаги (Рис. 4.9 е), причем над большей частью черноморской акватории. Наибольшие скорости роста дивергенции характерны для центральной части Черного моря, где в среднем дивергенция возрастает в 1,3 раза за 10 лет. Локальные области усиления конвергенции влаги отмечаются только в горах Западного Кавказа. Таким образом, наблюдаемые изменения дивергенции влаги могли бы послужить причиной уменьшения осадков в центральной и северо-восточной частях Черного моря и на метеостанциях. Аналогичные расчеты были проведены для реанализа ERA5, для ЧПК тренды влагосодержания по теоретическим оценкам выше фактических на $1.2 - 1.5 \text{ кг/м}^2/10$ лет, для юго-восточной части Черного моря – на $0.6 - 0.9 \text{ кг/м}^2/10$ лет (Прил. 16).

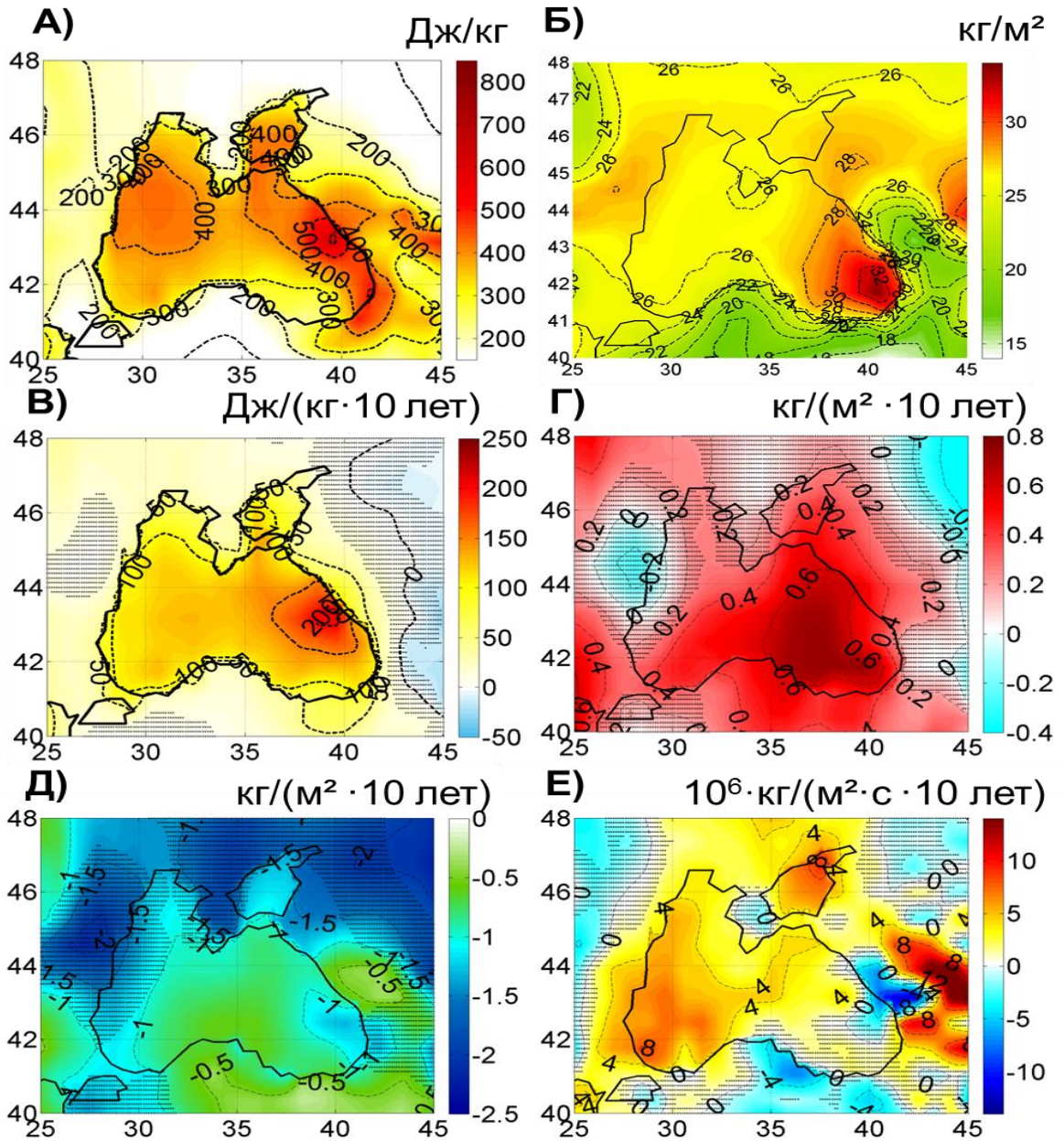


Рисунок 4.9. Данные реанализа ERA-Interim за период 1979-2018 гг. Средние летние значения CAPE (А, в Дж/кг) и влагосодержания (Б, в кг/м²); коэффициенты линейного тренда CAPE летом (В, в Дж/[кг за 10 лет]) и влагосодержания летом (Г, в кг/[м² за 10 лет]), Д – разность между данными, полученными по реанализу ERA-Interim и теоретически рассчитанными значениями величины тренда влагосодержания по уравнению Клаузиуса-Клапейрона летом (в кг/[м² за 10 лет]), Е – коэффициенты линейного тренда интегрального значения дивергенции влаги для лета (в кг/[м²с за 10 лет]). Штриховкой показаны области статистически незначимыми трендами.

Циркуляционный механизм, определяющий увеличение дивергенции влаги, может быть связан с изменениями интенсивности крупномасштабной меридиональной циркуляции в атмосфере. Например, в работе [Lu et al., 2009] показано, что начиная с середины XX века наблюдается уменьшение интенсивности ячейки Хедли, но при этом происходит ее расширение к полюсам, что может отражаться на особенностях циркуляции в умеренных широтах. В работе [Hudson et al., 2006] приведены количественные оценки расширения ячейки Хэдли, которые для периода 1979-2003 гг. составили в Северном полушарии в среднем 1° широты за 10 лет. По результатам расчета климатических моделей также получено, что в 21 веке может наблюдаться смещение к полюсам направления движения циклонов средних широт [Bengtsson et al., 2006].

Одной из характеристик динамики атмосферы выступает интенсивность вертикальных движений. На (Рис. 4.10) представлен результат расчета линейных трендов аналога вертикальной скорости в реанализе ERA-Interim. Адвекция положительной завихренности (соответствующей циклонам) без учета адвекции тепла приводит к уменьшению вертикальной скорости, что соответствует восходящим движениям. Адвекция отрицательной завихренности (соответствующей антициклонам) без учета адвекции тепла приводит к увеличению вертикальной скорости, что соответствует нисходящим движениям [Holton and Hakim, 2013.].

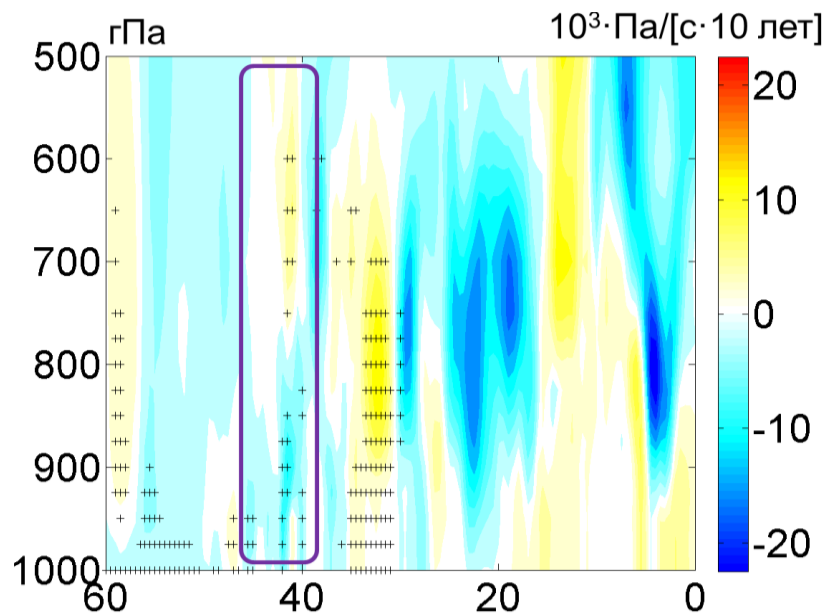


Рисунок 4.10. Средний меридиональный разрез для области $35-40^\circ$ в.д. коэффициентов линейных трендов (в $\text{Па}/\text{с}$ за 10 лет) для аналога вертикальной скорости по данным реанализа ERA-Interim для летнего сезона за период 1979-2018 гг. (значимые на уровне 0.05 тренды показаны штриховкой, прямоугольником выделена исследуемая область).

В юго-восточной части Черного моря наблюдается рост интенсивности вертикальных движений, который приурочен к району с максимальными темпами роста CAPE. Для всей остальной рассматриваемой территории характерен процесс уменьшения вертикальной составляющей скорости ветра, что может быть связано с изменением крупномасштабной циркуляции. Этот эффект, вместе с усилением дивергенции потоков влаги в регионе, может компенсировать увеличение влагосодержания атмосферного столба за счет роста температуры, в результате сумма средних и экстремальных осадков в регионе существенно не меняется. Такой механизм может объяснять полученные результаты для тенденций характеристик осадков.

Таким образом, в исследуемом регионе за последние 30 лет наблюдается значимое повышение температуры, ярче выраженное над сушей в летний период. Для метеорологических станций средняя скорость потепления в летний период составила $0.84^{\circ}\text{C}/10$ лет, для акватории Черного моря аналогичная величина составила $0.7^{\circ}\text{C}/10$ лет по данным реанализа ERA-Interim. При анализе временной изменчивости интенсивности осадков в регионе не обнаружено таких же однозначных зависимостей, как в температурном режиме. Для летних месяцев характерна слабая тенденция к уменьшению, а для зимнего сезона, наоборот, к увеличению сумм и интенсивности осадков. Выделить общие закономерности в характеристиках экстремальных осадков также не удалось.

С использованием данных реанализа ERA-Interim был проведен пространственный анализ изменений температурно-влажностного режима исследуемого региона. За последние десятилетия летом над Черным морем произошло трехкратное увеличение CAPE. Также для лета характерно потепление всей толщи тропосферы со средними темпами от $1^{\circ}\text{C}/10$ лет у поверхности до $0.4\text{-}0.5^{\circ}\text{C}/10$ лет на уровнях 200-300 гПа. Следствием таких значительных изменений могло бы быть существенное усиление конвекции, влагосодержания воздуха и, вероятно, осадков. Однако, тренд влагосодержания по данным реанализа существенно меньше, чем ожидаемый по соотношению Клаузиуса-Клапейрона, что указывает на наличие факторов, сдерживающих увеличение осадков в регионе. Показано, что причиной замедления роста влагосодержания может выступать увеличение дивергенции потоков влаги в регионе, а также уменьшение интенсивности восходящих движений в атмосфере. Такие процессы приводят к тому, что на фоне интенсивного роста температуры не отмечается изменения режима осадков.

4.4. Роль глобальных и региональных факторов в изменении экстремальности летних осадков на Черноморском побережье Кавказа ⁴

Как было показано в разделах 4.2. и 4.3., юг Европейской территории России по данным наблюдений за последние 40 лет не характеризуется значимым ростом как средних, так и экстремальных показателей, не наблюдается в регионе и отдельного усиления ливневых или обложных осадков [Chernokulsky et al., 2019]. Данные особенности могут быть обусловлены совместным действием динамических факторов, в частности механизмов подавления конвекции, а также общим изменением характеристик общей циркуляции атмосферы в средних широтах.

В данном разделе приведены результаты анализа современных тенденций изменения режима осадков и температуры в прибрежной зоне Азово-Черноморского региона России, также представлена оценка роли глобальных изменений климата и отдельного увеличения температуры Черного и/или Средиземного морей, а также внутренней изменчивости атмосферы в этих процессах.

В работе анализируются численные эксперименты с моделью общей циркуляции атмосферы ECHAM5. Численная модель общей циркуляции атмосферы ECHAM5 является последней версией климатической модели ECHAM, разработанной в Метеорологическом институте Макса Планка (Гамбург, Германия) на основе операционной модели прогноза погоды Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), адаптированной для климатических приложений. Это спектральная модель, использующая современные параметризации мезомасштабных физических процессов. Подробное описание модели приведено в [Roeckner et al., 2003]. Версия модели, использованная при запуске анализируемых экспериментов, имела горизонтальное спектральное разрешение T159, приблизительно соответствующее размерам модельной ячейки $0.7^{\circ} \times 0.7^{\circ}$ широты/долготы и 19 вертикальных уровней.

Ранее на результатах этих же экспериментов было показано [Volosciuk et al., 2015], что характеристики экстремальных осадков существенно зависят от пространственного

⁴ Раздел 4.4 подготовлен на основе статьи 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.

разрешения модели. Используемое в работе разрешение T159 позволяет в достаточной мере реалистично воспроизвести характеристики экстремальных осадков в исследуемом регионе. Проведенный ранее анализ этих экспериментов позволил выявить связь увеличения температуры Средиземного моря с участвовавшими в начале 21 века экстремальными осадками в центральной Европе [Volosciuk et al., 2016]. Показано, что повышение ТПО Средиземного моря приводит к увеличению влагосодержания средиземноморских циклонов за счет роста испарения с поверхности моря.

С использованием модели общей циркуляции атмосферы ECHAM5 ранее было проведено 4 серии численных экспериментов с разными условиями ТПО и концентрации морских льдов. Длительность каждого эксперимента составляла 40 лет. Концентрации парниковых газов в экспериментах сохранялись на одном уровне (1995 г.). Данная конфигурация экспериментов позволяет оценить вклад региональных и глобальных изменений климата в наблюдающиеся тенденции (Табл. 4.4).

В выбранных экспериментах использовались климатологические (с повторяющимся годовым ходом) граничные условия (ТПО и границы морских льдов) по данным HadISST1 для периодов 1970-1999 гг. и 2000-2012 гг. [Rayner et al., 2003]. Изменение температуры поверхности океана (ТПО) для Черного и Средиземного морей за летний период с 1870 по 2018 гг. по данным HadISST показано на (Рис. 4.11 а). Средняя разность ТПО для этих периодов в регионе летом составляет 0.8 °С. При этом заданное изменение ТПО сравнимо с амплитудой наблюдаемых межгодовых вариаций (среднеквадратическое отклонение для двух периодов составляет примерно 0.4 °С).

Таблица 4.4. Описание экспериментов модели ECHAM5

Название эксперимента	Характеристики ТПО и морского льда (HadISST)		
	Черное море	Средиземное море	Мировой океан
Холодный океан (ХО)	1970-1999	1970-1999	1970-1999
Теплые Черное и Средиземное моря (ТЧМ/СМ)	2000-2012	2000-2012	1970-1999
Теплое Черное море (ТЧМ)	2000-2012	1970-1999	1970-1999
Теплый океан (ТО)	2000-2012	2000-2012	2000-2012

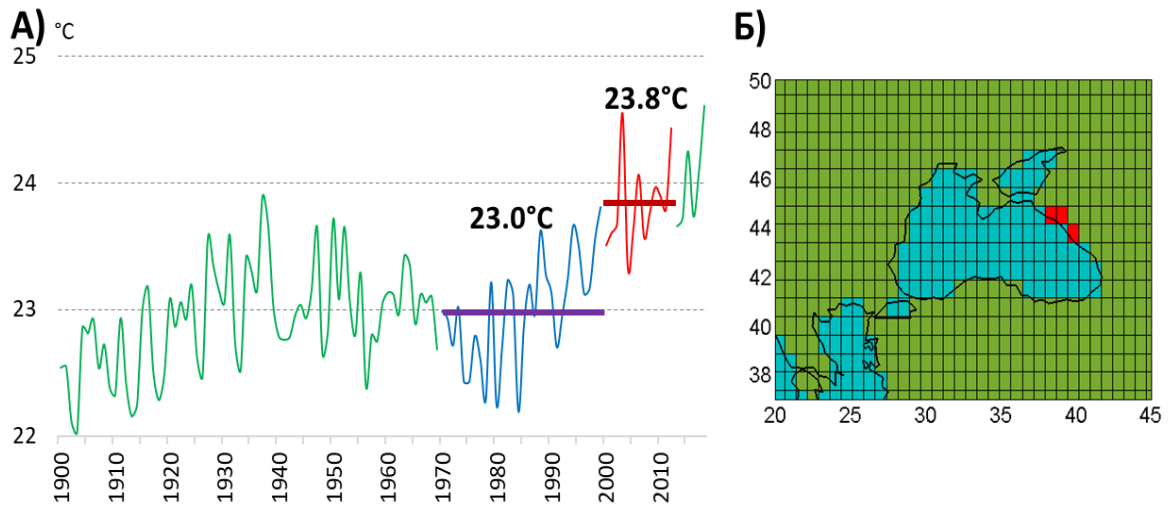


Рисунок 4.11. А – средние летние значения ТПО Средиземного и Черного морей по данным HadISST за период 1900-2018 гг. (Rayner N. A., et al., 2003). Синим и красным цветом выделены периоды 1970-1999 гг. и 2000-2012 гг. соответственно; Б – сетка модели ECHAM5 с типами поверхностей (синий – море, зеленый – суша, красный – суша, область побережья Черного моря, выбранная для составления композитных карт)

Для оценки вклада регионального и глобального повышения ТПО в изменение температурного режима и характеристик осадков на территории Черноморского побережья Кавказа (ЧПК) были вычислены средние разности между экспериментами:

- 1) “теплый океан” минус “холодный океан” (ТО-ХО) – вклад глобального изменения ТПО;
- 2) “теплое Черное море” минус “холодный океан” (ТЧМ-ХО) – вклад потепления только Черного моря;
- 3) “теплые Черное и Средиземное моря” – “холодный океан” (ТЧМ/СМ-ХО) – вклад совместного повышения ТПО Черного и Средиземного морей.

Для сопоставления результатов моделирования с наблюдаемыми изменениями также были использованы данные архива E-OBS [Cornes et al., 2018] и реанализа ERA-Interim [Dee et al., 2011].

В численных экспериментах также были выделены случаи с экстремальными осадками на ЧПК, которые использовались при проведении композитного анализа. Критерием для составления композитного анализа было выбрано превышение суточной интенсивности осадков значения 95-го перцентиля в полной выборке суточных осадков для контрольной области на побережье Черного моря (Рис. 4.11 б).

Изменение температуры воздуха на 2 м в модельных экспериментах представлено на (Рис. 4.12 а-в). Максимальные отличия от контрольного эксперимента с холодным океаном получены при глобальном повышении температуры над морями и составили 0.7 - 1.5 °С, над сушей около 0.5 °С. Максимальный рост температуры воздуха во всех экспериментах отмечен в юго-восточной части Черного моря (до 1.5 °С).

Интересной особенностью является понижение температуры на 0.3-0.5°С на юге России и в Закавказье при региональном повышении температуры ближайших морей. Региональные эффекты изменения ТПО в Черном и Средиземном море компенсируются при глобальном потеплении океана, что в итоге приводит к повышению температуры воздуха на побережье на 0.3-0.5 °С.

По данным E-OBS за исследуемый период повышение температуры практически повсеместно превысило 1 °С, на юге Восточной Европы температура увеличилась более чем на 1.5 °С (Рис. 4.12 г). Стоит отметить, что существенный вклад в среднее повышение температуры в период 2000-2012 гг. могут вносить продолжительные волны жары, наблюдавшиеся на территории Европы. летом 2003 и 2010 гг. [Stefanon et al.,2012].

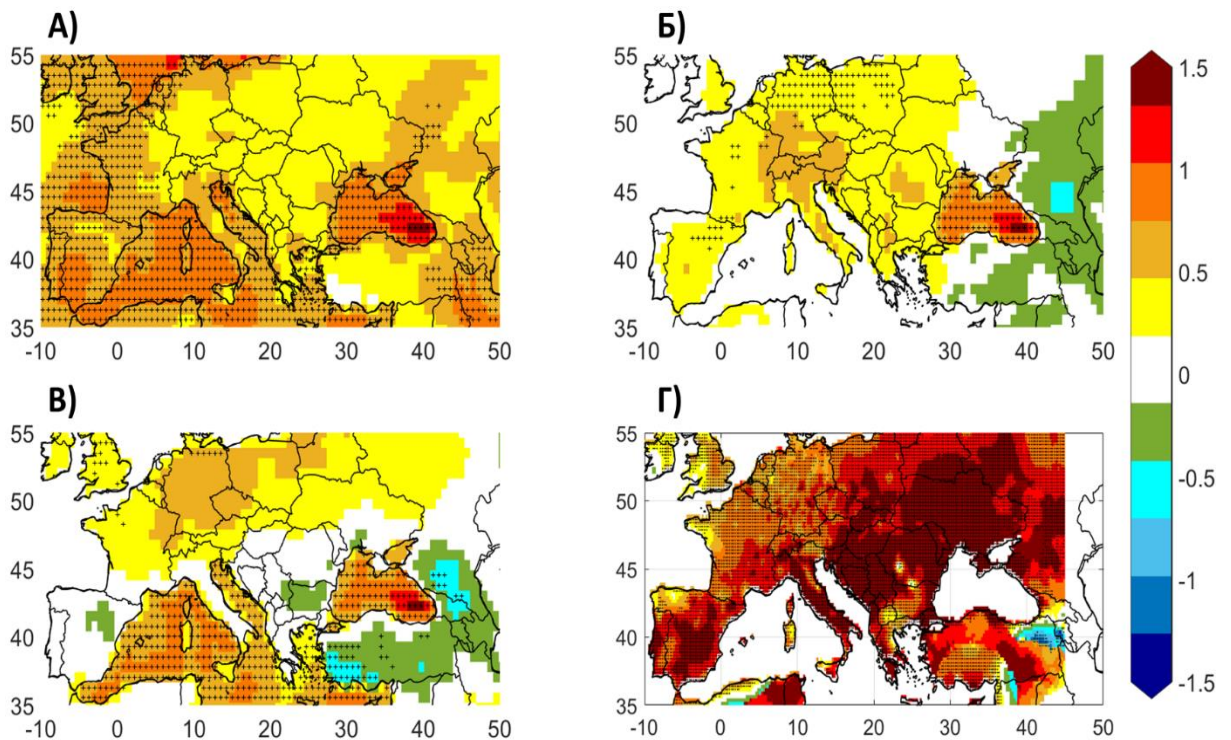


Рисунок 4.12. Разности средней приповерхностной температуры воздуха летом между экспериментами: (А) – (Теплый океан – Холодный океан), (Б) – (ТЧМ – Холодный океан), (В) – (ТЧМ/СМ – Холодный океан); (Г) – разность температур (2000-2012 гг.) – (1970-1999 гг.) по данным E-OBS. Значимые разности (на уровне 0.05) показаны точками

Изменение интенсивности осадков в модельных экспериментах показано на (Рис. 4.13). При глобальном повышении ТПО происходит небольшое (на 10-25% от нормы при холодном океане) увеличение средней интенсивности осадков над акваторией Черного моря. В то же время, при региональных изменениях это повышение выражено сильнее (на 25-50% от нормы) (Рис. 4.13 а-в).

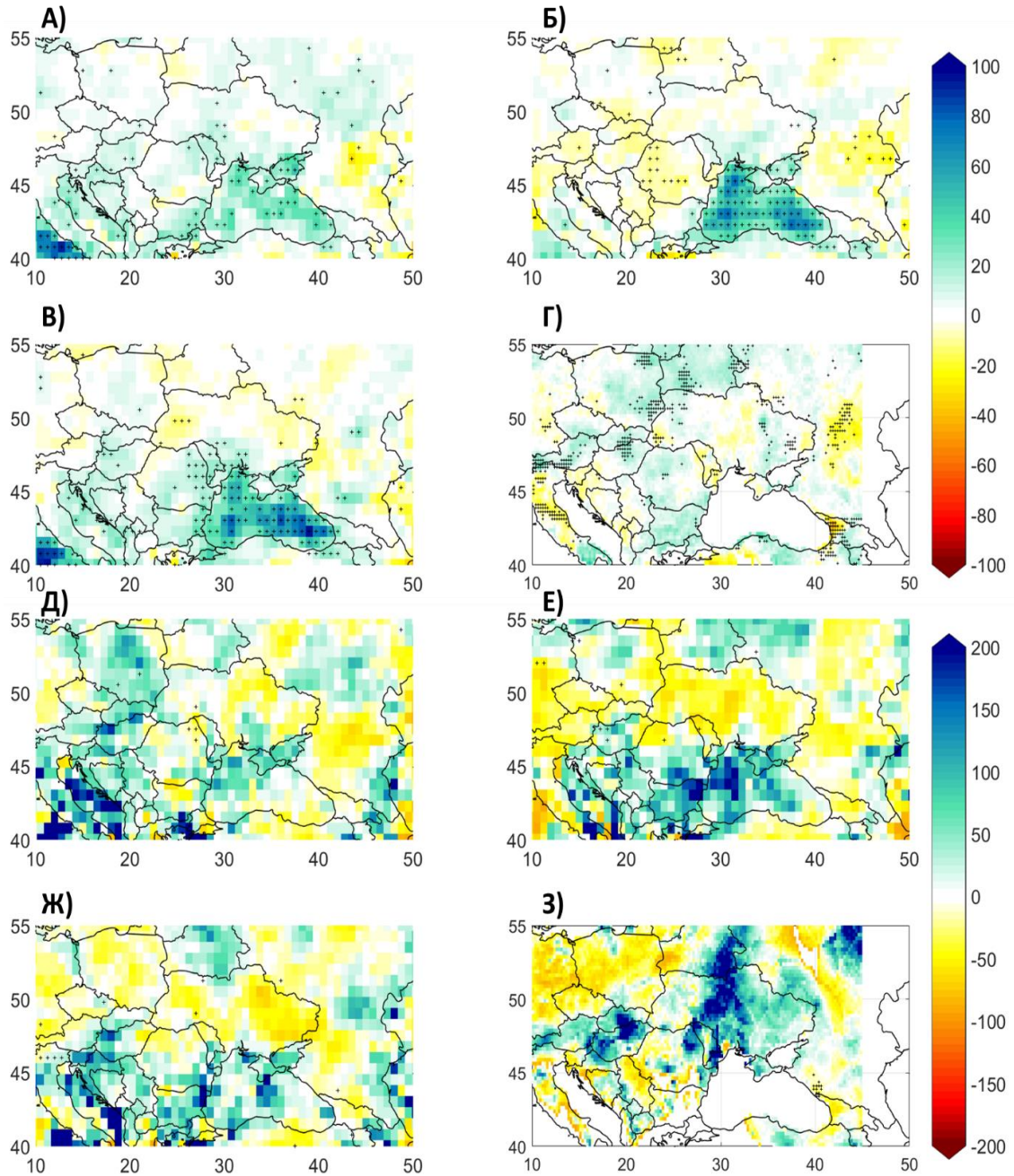


Рисунок 4.13. Средние разности между экспериментами летом для: (А – Г) интенсивности всех осадков и (Д – З) экстремальных осадков на Черноморском побережье (в %): А, Д – (Теплый океан – Холодный океан), Б, Е – (ТЧМ – Холодный океан), В, Ж – (ТЧМ/СМ – Холодный океан), Г, З – разность по данным E-OBS для периодов (2000-2012 гг.) – (1970-1999 гг.). Значимые разности (на уровне 0.05) показаны точками

Не смотря на увеличение осадков над поверхностью Черного моря, на побережье Черного моря и в более отдаленных от моря регионах статистически значимого увеличения интенсивности осадков не отмечается ни в одном из экспериментов, в некоторых регионах напротив, происходит некоторое уменьшение осадков (Астраханская и Волгоградская области). Данная оценка вклада глобального потепления в изменение режима осадков согласуется с ранее полученными результатами [Третий оценочный доклад ..., 2022], где для летнего сезона на юге ЕТР не было обнаружено значимых тенденций к увеличению среднего количества осадков.

Интенсивность экстремальных осадков при региональном повышении ТПО (Рис. 4.13 д, е, ж) увеличивается над морской поверхностью более чем в полтора раза над северо-западной частью акватории и уменьшается на побережье. Стоит отметить, что выявленные изменения статистически не значимы в первую очередь из-за редкости таких событий и ограниченности размера выборки.

По данным E-OBS на ЧПК статистически значимого увеличения экстремальных осадков также не обнаружено. Для данного региона характерна высокая пространственная неоднородность поля осадков, связанная в первую очередь с сочетанием разных типов подстилающей поверхностей и сложным рельефом.

Потепление климата может являться причиной изменения характеристик устойчивости атмосферы, определяющих в том числе и интенсивность конвективных процессов [Мохов, Акперов, 2006; Курганский и др., 2013; Чернокульский и др., 2017]. Повышение ТПО при глобальном потеплении может приводить к увеличению содержания влаги в нижнем слое атмосферы, что важно учитывать при анализе режима осадков в прибрежных регионах.

Для модельных экспериментов были посчитаны значения характеристик доступной конвективной потенциальной энергии и энергии конвективного подавления [Doswell and Shultz, 2006]. Доступная конвективная потенциальная энергия (Convective Available Potential Energy, CAPE) представляет собой количество потенциальной энергии плавучести в слое конвективной неустойчивости, которое может быть использовано для развития вертикальных движений. Энергия конвективного подавления (Convective Inhibition, CIN) является характеристикой энергии, которую необходимо затратить поднимающемуся воздуху в устойчивом слое для достижения уровня свободной

конвекции. Оба показателя сильно зависят от изменений вертикальных профилей температуры и влажности, а также характеристик поднимающейся воздушной массы.

По данным модельных экспериментов при региональном повышении ТПО Средиземного и Черного морей происходит более сильное увеличение CAPE над морями, чем при глобальных изменениях (Рис. 4.14 а, б). Полученный результат хорошо соотносится с результатами по увеличению средней интенсивности осадков преимущественно над акваториями (Рис. 4.13). В то же время, по данным реанализа ERA - Interim за последние 40 лет произошло существенное увеличение CAPE над Черным морем, превышающее модельные расчеты практически в два раза (Рис. 4.14 в). Однако над сушей статистически значимых изменений данного показателя не обнаружено. Для случаев экстремальных осадков повышение CAPE также наблюдается преимущественно над акваториями морей, величина изменений в экспериментах хорошо соотносится с аналогичными значениями по данным реанализа (Рис. 4.14). Как и в средних показателях, при экстремальных осадках повышение CAPE отмечается преимущественно над акваториями и практически не затрагивает побережье.

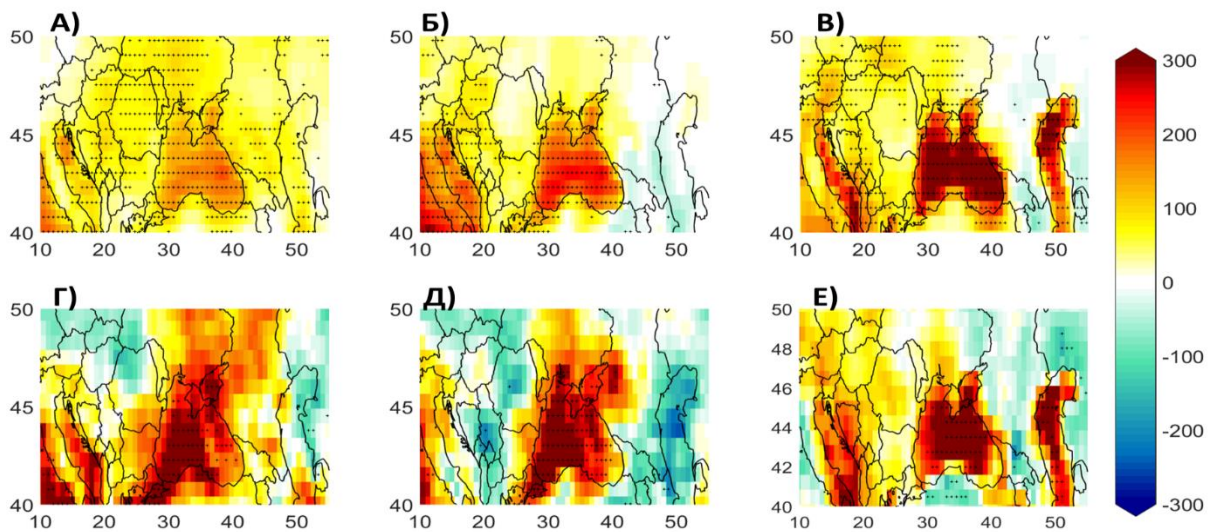


Рисунок 4.14. Средние разности между экспериментами для средних значений CAPE (А, Б) и при экстремальных осадках (Г, Д) (в Дж/кг): А, Г – (Теплый океан – Холодный океан), Б, Д – (ТЧМ/СМ – Холодный океан); В – средние разности между периодами 2018-1999 гг. и 1979-1998 гг. по реанализу ERA-Interim для CAPE, Е – аналогично В, но при экстремальных осадках. Значимые разности (на уровне 0.05) показаны штриховкой

При глобальном повышении ТПО величина CIN над морями практически не изменилась, над сушей отмечается небольшое усиление

подавления конвекции (Рис. 4.15 а). Однако, при потеплении только Черного и Средиземного морей произошло значимое уменьшение CIN над морями (Рис. 4.15 б).

Таким образом, повышение ТПО только Черного и Средиземного морей приводит к интенсификации процессов конвекции над морями, которое может поддерживаться также за счет уменьшения CIN. Глобальное повышение ТПО также приводит увеличению CAPE, но менее сильному, при этом значения CIN в среднем практически не изменяются.

Экстремальные осадки при региональном повышении ТПО возникают в условиях высоких значений CAPE, при этом CIN также незначительно снижается. В условиях глобального повышения ТПО при аналогичных значениях CAPE подавление конвекции выражено сильнее, что может служить фактором, влияющим на стабильность осадков в регионе.

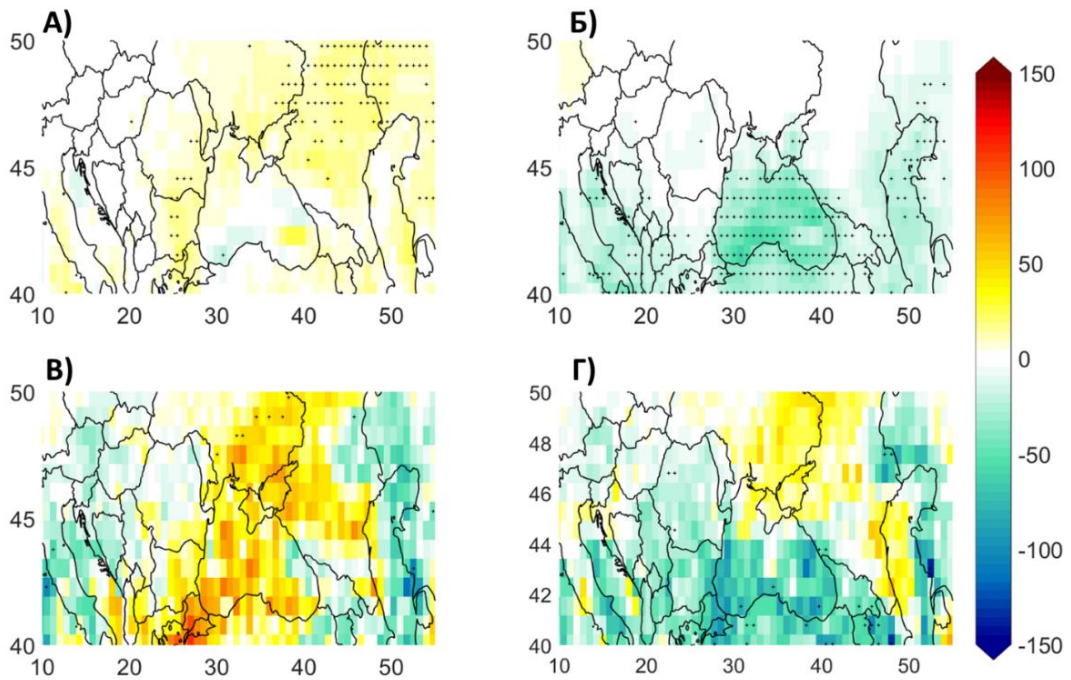


Рисунок 4.15. Средние разности между экспериментами для средних значений CIN (А, Б) и при экстремальных осадках (В, Г) (в Дж/кг): А, В – (Теплый океан – Холодный океан), Б, Г – (ГЧМ/СМ – Холодный океан). Значимые разности (на уровне 0.05) показаны штриховкой

Перечисленные сочетания факторов можно считать ответственными за небольшое увеличение осадков над морем в региональных экспериментах и еще более слабое изменение режима осадков в глобальном эксперименте (Рис. 4.13). При этом изменение

условий над акваториями не приводит к сильной перестройке метеорологических условий над сушей.

Еще одним важным фактором, влияющим на характеристики осадков, является дивергенция потоков влаги в атмосфере. Получено, что при потеплении климата дивергенция влаги над морем возрастает, захватывая при этом и часть побережья Черного моря. Усиление дивергенции влаги над морем происходит не только в глобальном эксперименте (Рис. 4.16 а), но и при исключительном действии региональных изменений ТПО (Рис. 4.16 б, в).

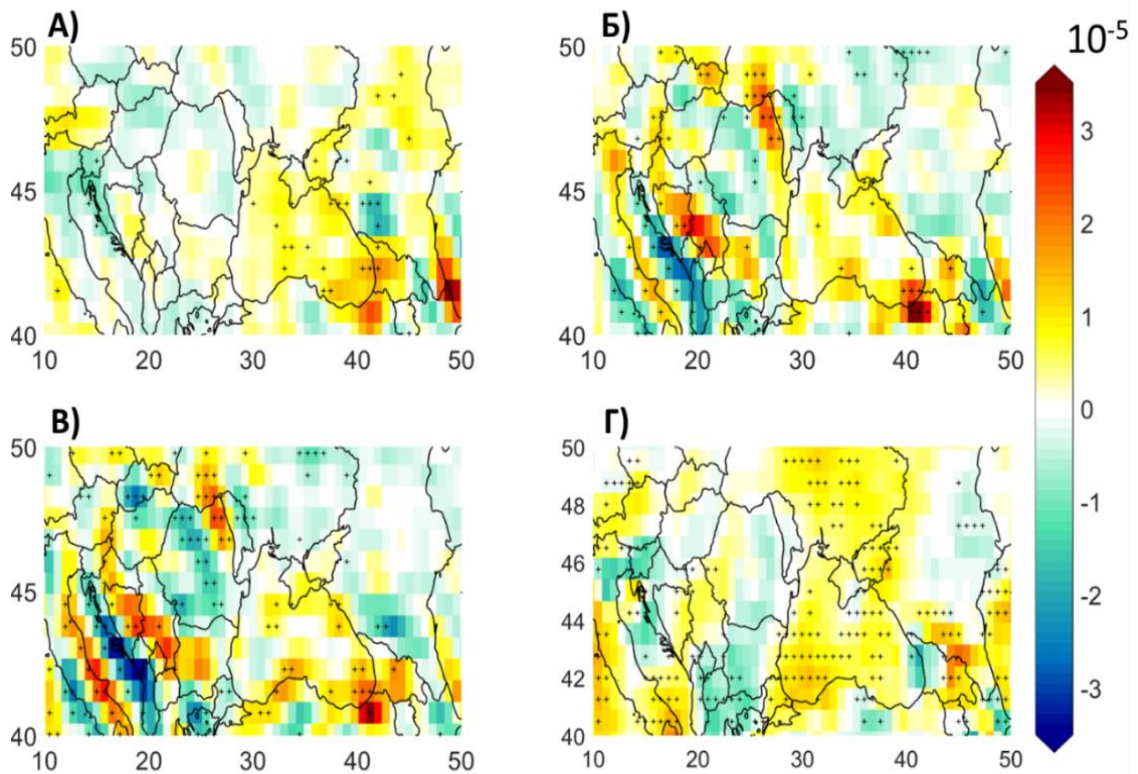


Рисунок 4.16. А-В: средние разности между экспериментами для дивергенции потоков влаги (в $\text{кг}/[\text{с}\cdot\text{м}^2]$): А – (Теплый океан – Холодный океан), Б – (ТЧМ – Холодный океан), В – (ТЧМ/СМ – Холодный океан); Г – разности дивергенции потоков влаги (1999 – 2018 гг.) – (1979-1998 гг.) по данным ERA-Interim. Значимые разности (на уровне 0.05) показаны точками

Моря являются мощными источниками влаги, над ними быстрее развивается конвекция, но увеличение дивергенции влаги способно компенсировать увеличение регионального влагосодержания атмосферы при росте испарения с поверхности морей. Можно предположить, что при отсутствии в регионе сильной дивергенции влаги как фактора подавления конвекции, здесь могло бы отмечаться более значительное

увеличение осадков, чем наблюдается по данным метеорологических станций, глобальных экспериментов и реанализа. Над сушей изменения всех параметров выражены намного слабее, что в некоторой степени согласуется с отсутствием явных изменений в режиме осадков.

Также влияние динамического фактора подтверждается при анализе разностей потоков влаги в регионе (Рис. 4.17). При глобальном увеличении ТПО западный перенос воздушных масс усиливается по данным расчетов, особенно в умеренных широтах севернее Черного моря. При этом аномалии потоков влаги в таком случае над сушей имеют отрицательный знак, а направление потока соответствует движению воздушных масс с суши на море. Региональное увеличение ТПО Черного и Средиземного морей приводит к усилению потоков влаги из Черного моря на его северо - восточное побережье (Рис. 4.17 г).

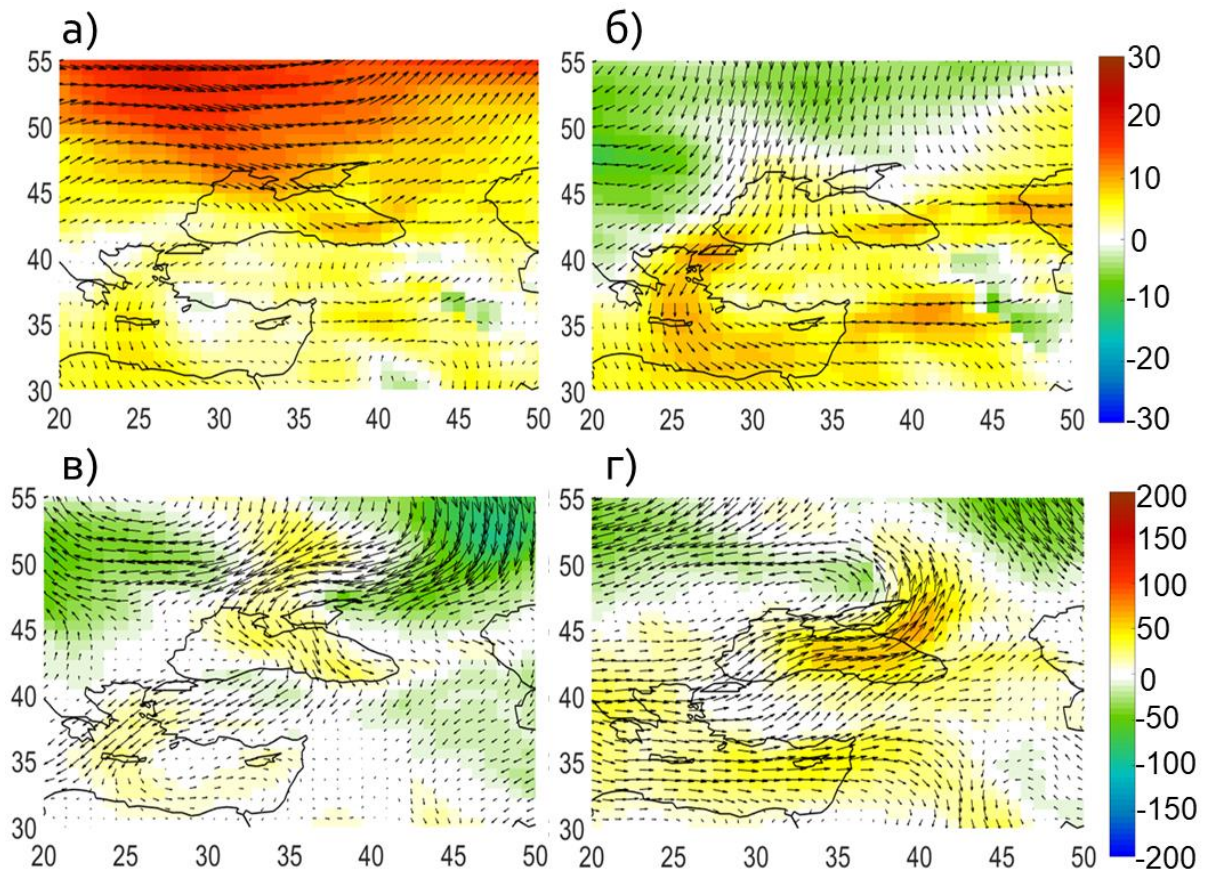


Рисунок 4.17. Разности между экспериментами для потоков влаги и его направления для средних значений (а, б) и при экстремальных осадках (в, г) (в $\text{кг}/[\text{с}\cdot\text{м}]$): а, в – (Теплый океан – Холодный океан), б, г – (ГЧМ/СМ – Холодный океан) по данным ERA-Interim.

Таким образом, проведен анализ результатов экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы ECHAM5, выявлены особенности регионального отклика режима осадков на изменение температуры поверхности как Мирового океана, так и исключительно Черного и/или Средиземного морей. Показано, что при отдельном повышении температуры на побережье Черного моря не наблюдается статистически значимых изменений как средней интенсивности осадков, так и их экстремальных значений. В то же время над морями интенсивность осадков в среднем увеличивается, причем при региональном повышении ТПО этот рост выражен сильнее, чем при изменении ТПО в глобальном масштабе.

Анализ результатов расчета характеристик процессов конвекции в атмосфере (CAPE и CIN) показал, что региональное повышение ТПО Черного и Средиземного морей приводит к образованию более благоприятных условий для развития конвективных процессов, переноса влаги с моря на сушу и, как следствие, выпадения осадков над морем и прибрежными регионами ЧПК. Глобальное увеличение ТПО, напротив, приводит к усилению процессов, ответственных за подавление конвекции.

Одним из факторов, который также может сдерживать увеличение осадков в регионе, является изменение динамики атмосферы. Как по данным наблюдений, так и по результатам модельных экспериментов, в регионе отмечается усиление дивергенции потоков влаги, выраженное ярче всего над поверхностью моря. Поэтому, несмотря на значительное увеличение CAPE, над морями подавление конвекции и усиление дивергенции может приводить к ослаблению вертикальных движений и, как следствие, влиять на выпадение осадков. При региональном повышении ТПО перечисленные сдерживающие факторы выражены слабее, что приводит к более заметному увеличению осадков над морем. Важно отметить, что влага с моря потенциально может поступать на побережье при циркуляционных условиях, способствующих переносу теплого насыщенного влагой воздуха с моря на сушу, как, например, случилось при катастрофическом наводнении в Крымске в 2012 году [Meredith et al., 2015a].

Заключение

Проведенные исследования изменений характеристик экстремальных осадков на территории России позволяют сделать следующие выводы:

1. Исследована связь суточной интенсивности экстремальных осадков и приземной температуры воздуха в 1966-2017 гг. по данным метеорологических станций и в 1979-2020 гг. по реанализу ERA5 на территории России. Показано, что зимой преимущественно происходит увеличение экстремальных осадков всех типов при повышении температуры в соответствии с соотношением Клаузиуса-Клапейрона. Для Дальнего Востока зафиксировано двойное превышение соотношения Клаузиуса-Клапейрона для обложных осадков. Летом, по данным метеостанций и реанализа, в большинстве регионов усиление экстремальных осадков происходит при температурах до 15°-20°С; дальнейшее повышение температуры сопровождается стабилизацией или уменьшением интенсивности экстремальных осадков. Отчетливее всего эта особенность летом выражена на юге Европейской территории России для конвективных осадков. Также показано, что летом при температурах выше 15-20° происходит не только уменьшение интенсивности экстремальных осадков, но и снижением относительной влажности, что указывает на важность изменений конвергенции влаги и испарения при осадкообразовании в условиях роста температуры. Представленные результаты подчеркивают многогранность факторов, влияющих на образование экстремальных осадков на территории России.

2. Согласно эмпирическим данным в последние десятилетия на территории России зимой происходит значительное увеличение сезонных сумм осадков и повторяемости дней с экстремальными осадками на побережье Дальнего Востока и в центральной части Европейской территории России (ЕТР). Также отмечено уменьшение повторяемости дней с осадками на большинстве метеорологических станций России. Летом увеличение сумм осадков и повторяемости дней с осадками обнаружено в Западной Сибири и на побережье Охотского моря и Тихого океана. Уменьшение сумм и повторяемости осадков получены для юга ЕТР и юга Восточной Сибири.

3. Модели климата проекта CMIP6 в среднем для модельного ансамбля в XX и XXI столетиях показывают рост сумм осадков и повторяемости экстремальных осадков на большей части территории России в зимний период, причем данные тенденции могут усилиться в ближайшие десятилетия. В том числе, летом в Восточной Сибири

отмечается значительное увеличение как сезонных сумм осадков, так и вклада экстремальных осадков в общее количество. При этом для юга ЕТР в целом прогнозируется слабое уменьшение сезонных сумм осадков и количества дней с осадками. Следует, однако, отметить сильные межмодельные различия, особенно в летний сезон, а также значительную межгодовую естественную изменчивость характеристик осадков.

4. Исследованы особенности изменений климата Черного моря и его северо-восточного побережья за последние десятилетия. Показано, что в целом для региона отмечается повышение приземной температуры воздуха с максимумом в теплое время года. Анализ трендов сезонных сумм осадков, а также интенсивности осадков не показал статистически значимых изменений. Зимой характерно уменьшение осадков на побережье и их увеличение над поверхностью Черного моря. Летом отмечено уменьшение осадков практически во всей исследуемой территории. Несмотря на увеличение летом интегрального влагосодержания и CAPE, не выявлено статистически значимого увеличения среднего количества осадков, их интенсивности и максимальных значений. Это может быть связано с усилением дивергенции влаги в регионе вследствие интенсификации крупномасштабных нисходящих потоков.

5. Проведена оценка вклада отклика изменений характеристик экстремальных осадков на увеличение температуры поверхности Черного и Средиземного морей, а также глобальных изменений температуры поверхности океана (ТПО) за последние 40 лет в изменения характеристик летних экстремальных осадков на Черноморском побережье Кавказа в летний период с использованием результатов численных экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы ECHAM5.

6. Глобальное повышение ТПО на 0.8° приводит к увеличению средней интенсивности осадков на 10-25% над Черным морем, но на Черноморском побережье Кавказа не отмечается статистически значимого увеличения среднего количества осадков и их экстремальных значений. В то же время аналогичное региональное увеличение ТПО Черного и Средиземного морей приводит к увеличению интенсивности осадков на 25-50%. Показано, что при глобальном повышении ТПО в модели отмечается усиление факторов, препятствующих увеличению интенсивности региональных осадков, что также согласуется с данными наблюдений за последние десятилетия.

Список литературы

1. Акперов М. Г. и др. Функции распределения вероятностей циклонов и антициклонов по данным реанализа NCEP/NCAR и модели климата ИВМ РАН //Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 43. – №. 6. – С. 764 - 772.
2. Акперов М.Г., Мохов И.И. Изменения циклонической активности и осадков в атмосфере внетропических широт Северного полушария в последние десятилетия по данным реанализа ERA5 //Оптика атмосферы и океана. – 2023. – Т. 36. – №. 5. – С. 377 - 383.
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. Алешина М. А., Торопов П. А., Семенов В. А. Изменение температурно-влажностного режима Черноморского побережья Кавказа в период 1982-2014 гг. //Метеорология и гидрология. — 2018. — № 4. — С. 41–53.
5. Алешина М.А., Семенов В.А. Изменения характеристик осадков на территории России в XX-XXI вв. по данным ансамбля моделей CMIP6 //Фундаментальная и прикладная климатология. – 2022. – Т. 8. – №. 4. – С. 424-440.
6. Бардин М. Е., Платова Т. В., Самохина О. Ф. Долгопериодные изменения повторяемости циклонов в умеренных широтах Северного полушария //Фундаментальная и прикладная климатология. – 2021. – Т. 7. – №. 2. – С. 57-80.
7. Бардин М. Ю. и др. Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга //Метеорология и гидрология. – 2020. – №. 5. – С. 29 - 45.
8. Бардин М. Ю., Платова Т. В., Самохина О. Ф. Изменчивость антициклонической активности в умеренных широтах Северного полушария //Фундаментальная и прикладная климатология. – 2019. – Т. 3. – С. 32-58.
9. Богданович А. Ю. и др. Климатические угрозы на Северо-Западе Черноморского побережья Кавказа: современные тренды //Фундаментальная и прикладная климатология. – 2021. – Т. 7. – №. 4. – С. 46–72.

10. Бокучава Д. Д., Семенов В. А. Роль естественных колебаний и факторов внешнего воздействия на климат в потеплении середины XX века в Северном полушарии //Лёд и Снег. – 2022. – Т. 62. – №. 3. – С. 455-474.
11. Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Александрова Т. М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТР) //Свидетельство о государственной регистрации базы данных. – 2014. – Т. 2014620942. – С. 2014.
12. Володин Е.М., Галин В.Я., Грицун А.С. и др. Под ред. Яковлева Н.Г. Математическое моделирование Земной системы //М.: МАКС. Пресс, 2016. — 328 с.
13. Вязилова Н. А., Вязилов А. Е. Климатические особенности повторяемости циклонов с различной интенсивностью осадков в Северной Атлантике и Европе //Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации-Мирового центра данных. – 2018. – №. 182. – С. 119-128.
14. Гандин Л. С. Объективный анализ метеорологических полей. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1963. – С. 287-287.
15. Георгиевский В.Ю., Коронкевич Н.И., Алексеевский Н.И. Водные ресурсы и гидрологический режим рек РФ в условиях изменения климата //В сб.: Пленарные доклады VII Всероссийского гидрологического съезда, 19-21 ноября 2013 г. – СПб.; ГГИ, 2014, С. 79-102.
16. Григорьев В. Ю. и др. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России //Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2022. – Т. 86. – №. 3. – С. 435- 446.
17. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Оценка возможного вклада глобального потепления в генезис экстремально жарких летних сезонов на европейской территории РФ //Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 47. – №. 6. – С. 717 – 717.
18. Данилов-Данильян В. И. и др. Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне реки Амур: условия формирования, оценка повторяемости, результаты моделирования //Водные ресурсы. – 2014. – Т. 41. – №. 2. – С. 111-111.
19. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. – Москва, 2022. – 104 стр.

20. Елисеев А.В., Семенов В.А. Изменения климата Арктики в XXI веке: ансамблевые модельные оценки с учетом реалистичности воспроизведения современного климата // Доклады Академии наук. – Федеральное государственное унитарное предприятие Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Наука, 2016. Т. 471. №. 2. С. 214-218.
21. Золина О. Г., Булыгина О. Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2016. – Т. 1. – С. 84-103.
22. Исаев А. А. Статистика в метеорологии и климатологии. – МГУ, 1988.
23. Катцов В.М., Павлова Т.В., Говоркова В.А., Мелешко В.П., Спорышев П.В., Хлебникова Е.И., Школьник И.М., 2022: Сценарные прогнозы изменений климата на территории России в XXI веке на основе ансамблевых расчетов с моделями CMIP6 // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.- Вып. 604. – С.5-54.
24. Кислов А. В. Климат в прошлом, настоящем и будущем // М.: МАИК “Наука/Интерпериодика. – 2001.
25. Кислов А. В., Антипина У. И., Корнева И. А. Экстремальные осадки Европейского сектора Арктики в летний период: статистика и синоптические модели // Метеорология и гидрология. – 2021. – №. 7. – С. 20-34.
26. Кислов А. В., Суркова Г. В. Климатология. Учебник. 2-е изд // М.: Академия. – 2014.
27. Кислов А. В., Суркова Г. В., Матвеева Т. А. Метеорологические условия температурного диапазона «около нуля °С» в условиях меняющегося климата Западной Арктики // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2017. – Т. 1. – С. 69.
28. Коваленко О. Ю., Бардин М. Ю., Воскресенская Е. Н. Изменения характеристик экстремальности температуры воздуха в причерномосрком регионе и их изменчивость в связи с крупномасштабными климатическими процессами межгодового масштаба // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2017. – Т. 2. – С. 42-62.
29. Кононова Н. К. Особенности циркуляции атмосферы Северного полушария в конце XX-начале XXI века и их отражение в климате // Сложные системы. – 2014. – №. 2. – С. 11 -35.
30. Коршунов А. А., Шаймарданов М. З. База данных об опасных гидрометеорологических явлениях // Труды ВНИИГМИ-МЦД. – 2007. – №. 172. – С. 132 - 139.

31. Кочугова Е. А. Изменчивость экстремальных осадков на территории Иркутской области //Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития. – 2017. – С. 94-95.
32. 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.
33. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – 1984.
34. Матвеева Т. А., Гущина Д. Ю., Колтерманн К. П. Факторы катастрофических наводнений в устьях рек европейской территории России //Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2013. – №. 2. – С. 70-77.
35. Матвеева Т. А., Гущина Д. Ю., Золина О. Г. Крупномасштабные индикаторы экстремальных осадков в прибрежных природно-экономических зонах европейской территории России //Метеорология и гидрология. – 2015. – №. 11. – С. 20-32.
36. Мелешко В. П. и др. Потепление климата Арктики и аномально холодная погода зимой в 1979-2017 гг. в Северной Евразии //Метеорология и гидрология. – 2019. – №. 4. – С. 15-25.
37. Мохов И. И. и др. Блокинги в Северном полушарии и Евро-Атлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам //Доклады академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение" Российская академия наук", 2013. – Т. 449. – №. 5. – С. 582-582.
38. Мохов И. И. и др. Экстремальные режимы осадков в регионах северной Евразии в XX веке и их возможные изменения в XXI веке //Доклады Академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение" Российская академия наук", 2005. – Т. 402. – №. 6. – С. 818-821.
39. Мохов И. И. Особенности современных изменений климата в Арктике и их последствий //Проблемы Арктики и Антарктики. – 2020. – Т. 66. – №. 4. – С. 446-462.
40. Мохов И. И., Акперов М. Г. Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа //Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 42. – №. 4. – С. 467 - 475.
41. Мохов И. И., Петухов В. К. Блокинги и их тенденции изменения //Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 1997. – Т. 337. – №. 5. – С. 687-689.

42. Мохов И. И., Семенов В. А. Погодно-климатические аномалии в российских регионах и их связь с глобальными изменениями климата //Метеорология и гидрология. – 2016. – №. 2. – С. 16-28.
43. Мохов И. И., Тимажев А. В. Атмосферные блокирования и изменения их повторяемости в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей //Метеорология и гидрология. – 2019. – №. 6. – С. 5-16.
44. Семенов В. А. Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи //Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 57. – №. 1. – С. 21-33.
45. Семенов В. А., Мохов И. И., Латиф М. Влияние температуры поверхности океана и границ морского льда на изменение регионального климата в Евразии за последние десятилетия //Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 48. – №. 4. – С. 403-421.
46. Семенов В.А., Алешина М.А. Сценарные прогнозы изменений температурного и гидрологического режима Крыма в XXI веке по данным моделей климата CMIP6 //Водные ресурсы. – 2022. – Т. 49. – №. 4. – С. 506-516.
47. Ташилова А. А. Изменения в распределении региональных осадков в ответ на глобальное потепление //Наука. Инновации. Технологии. – 2021. – №. 3. – С. 73 - 90.
48. Титкова Т. Б., Черенкова Е. А., Семенов В. А. Региональные особенности изменения зимних экстремальных температур и осадков на территории России в 1970–2015 гг //Лёд и снег. – 2018. – Т. 58. – №. 4. – С. 486-497.
49. Торопов П. А., Алешина М. А., Семенов В. А. Тенденции изменений климата Черноморско-Каспийского региона за последние 30 лет //Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2018. — № 2. — С. 67–77.
50. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. //Санкт-Петербург: Научное издание, 2022. – 124 с.
51. Харюткина Е. В. и др. Тенденции изменения экстремальности климата Западной Сибири в конце XX-начале XXI веков //Фундаментальная и прикладная климатология. – 2019. – Т. 2. – С. 45-65.
52. 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.
53. Черенкова Е. А. Количественные оценки атмосферных засух в федеральных округах Европейской территории России //Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2015. – №. 6. – С. 76-85.
54. Чернокульский А. В. и др. Климатология осадков разного генезиса в Северной Евразии //Метеорология и гидрология. – 2018. – №. 7. – С. 5-18.
55. Чернокульский А. В., Курганский М. В., Мохов И. И. Анализ изменений условий смерчегенеза в Северной Евразии с использованием простого индекса конвективной неустойчивости атмосферы //Доклады Академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение" Российская академия наук", 2017. – Т. 477. – №. 6. – С. 722-727.
56. Шабанов П.А., Матвеева Т.А., Маркина М.Ю. Межгодовые изменения событий очень сильных осадков на европейской части России //Фундаментальная и прикладная климатология. –2017. –№ 4 – С. 106–123.
57. Шестакова А. А., Моисеенко К. Б., Торопов П. А. Гидродинамические аспекты эпизодов новороссийской боры 2012–2013 гг. //Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 51. – №. 5. – С. 602.
58. Ширяев М., Семенов В., Ширяева А. Изменения продолжительности устойчивых теплого и холодного сезонов на территории России в начале XXI века //Доклады академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение" Российская академия наук", 2018. – Т. 481. – №. 2. – С. 207-210.
59. Adler R. F. et al. Global precipitation: Means, variations and trends during the satellite era (1979–2014) //Surveys in Geophysics. – 2017. – Т. 38. – С. 679-699.
60. Adler R. F. et al. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly analysis (new version 2.3) and a review of 2017 global precipitation //Atmosphere. – 2018. – Т. 9. – №. 4. – С. 138.
61. Aleshina M. A., Semenov V. A., Chernokulsky A. V. A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data //Environmental Research Letters. – 2021. – Т. 16. – №. 10. – С. 105004.
62. Alexeevsky N. et al. Causes and systematics of inundations of the Krasnodar territory on the Russian Black Sea coast //Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2016. – Т. 16. – №. 6. – С. 1289-1308.

63. Ali H., Fowler H. J., Mishra V. Global observational evidence of strong linkage between dew point temperature and precipitation extremes //Geophysical Research Letters. – 2018. – T. 45. – №. 22. – C. 12,320-12,330.
64. Allan R. P., Soden B. J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes //Science. – 2008. – T. 321. – №. 5895. – C. 1481-1484.
65. Asadieh B., Krakauer N. Y. Global trends in extreme precipitation: climate models versus observations //Hydrology and Earth System Sciences. – 2015. – T. 19. – №. 2. – C. 877-891.
66. Bandhauer M. et al. Evaluation of daily precipitation analyses in E-OBS (v19. 0e) and ERA5 by comparison to regional high-resolution datasets in European regions //International Journal of Climatology. – 2022. – T. 42. – №. 2. – C. 727-747.
67. Bao J. et al. Future increases in extreme precipitation exceed observed scaling rates //Nature Climate Change. – 2017. – T. 7. – №. 2. – C. 128-132.
68. Barbero R. et al. Temperature-extreme precipitation scaling: a two-way causality? //International Journal of Climatology. – 2018. – T. 38. – C. e1274-e1279.
69. Bekryaev R. V., Polyakov I. V., Alexeev V. A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming //Journal of Climate. – 2010. – T. 23. – №. 14. – C. 3888-3906.
70. Bengtsson L., Hodges K. I., Roeckner E. Storm tracks and climate change //Journal of Climate. – 2006. – T. 19. – №. 15. – C. 3518-3543.].
71. Berg P., Haerter J. O. Seasonal characteristics of the relationship between daily precipitation intensity and surface temperature //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2009. – T. 114. – №. D18.
72. Berry G., Reeder M. J., Jakob C. A global climatology of atmospheric fronts //Geophysical Research Letters. – 2011. – T. 38. – №. 4.
73. Byrne M. P., O’Gorman P. A. The response of precipitation minus evapotranspiration to climate warming: Why the “wet-get-wetter, dry-get-drier” scaling does not hold over land //Journal of Climate. – 2015. – T. 28. – №. 20. – C. 8078-8092.
74. Chernokulsky A. et al. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades //Environmental Research Letters. – 2019. – T. 14. – №. 4. – C. 045001.
75. Chou C. et al. Increase in the range between wet and dry season precipitation //Nature Geoscience. – 2013. – T. 6. – №. 4. – C. 263-267.

76. Christensen O. B., Christensen J. H. Intensification of extreme European summer precipitation in a warmer climate //Global and Planetary Change. – 2004. – T. 44. – №. 1-4. – C. 107-117.
77. Christiansen B. Understanding the Distribution of Multimodel Ensembles //Journal of Climate, 2020. T. 33. №. 21. C. 9447-9465.
78. Colman R., Soden B. J. Water vapor and lapse rate feedbacks in the climate system //Reviews of Modern Physics. – 2021. – T. 93. – №. 4. – C. 045002.
79. Cornes R. C. et al. An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2018. – T. 123. – №. 17. – C. 9391 - 9409.
80. Croitoru A.E. et al. Changes in precipitation extremes on the Black Sea Western Coast //Global and Planetary Change, 2013. T. 102. C. 10-19.
81. Crossett C. C. et al. Evaluation of daily precipitation from the ERA5 global reanalysis against GHCN observations in the northeastern United States //Climate. – 2020. – T. 8. – №. 12. – C. 148.
82. Dee D. P. et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system //Quarterly Journal of the royal meteorological society. – 2011. – T. 137. – №. 656. – C. 553-597.
83. Donat M. G. et al. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions //Nature Climate Change. – 2016. – T. 6. – №. 5. – C. 508-513.
84. Doswell III C. A., Schultz D. M. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms //E-Journal of Severe Storms Meteorology. – 2006. – T. 1. – №. 3. – C. 1-22.
85. Drobinski P. et al. Scaling of precipitation extremes with temperature in the French Mediterranean region: What explains the hook shape? //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2016. – T. 121. – №. 7. – C. 3100-3119.
86. Du H. et al. Extreme precipitation on consecutive days occurs more often in a warming climate //Bulletin of the American Meteorological Society. – 2022. – T. 103. – №. 4. – C. E1134 - E1149.
87. Dunning C. M., Black E., Allan R. P. Later wet seasons with more intense rainfall over Africa under future climate change //Journal of Climate. – 2018. – T. 31. – №. 23. – C. 9719 - 9738.

88. Emori S., Brown S. J. Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate //Geophysical Research Letters. – 2005. – T. 32. – №. 17.
89. Eyring V., Bony S., Meehl G. A., Senior C. A., Stevens B., Stouffer R. J., Taylor K. E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization //Geoscientific Model Development, 2016. T. 9. №. 5. C. 1937-1958.
90. Eyring V. et al. (eds.) Human Influence on the Climate System. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change //Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021 – pp. 423–552.
91. Fowler H. J. et al. Towards advancing scientific knowledge of climate change impacts on short-duration rainfall extremes //Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2021. – T. 379. – №. 2195. – C. 20190542.
92. Frolova N. L. et al. Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment //Natural Hazards. – 2017. – T. 88. – C. 103-131.
93. Gao X. et al. Temperature dependence of extreme precipitation over mainland China //Journal of Hydrology. – 2020. – T. 583. – C. 124595.
94. Gleckler P. J., Taylor K. E., Doutriaux C. Performance metrics for climate models //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2008. – T. 113. – №. D6.
95. Goubanova K., Li L. Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean basin in an ensemble of future climate scenario simulations //Global and Planetary Change. – 2007. – T. 57. – №. 1-2. – C. 27-42.
96. Greve P. et al. Global assessment of trends in wetting and drying over land //Nature geoscience. – 2014. – T. 7. – №. 10. – C. 716-721.
97. Greve P., Seneviratne S. I. Assessment of future changes in water availability and aridity //Geophysical research letters. – 2015. – T. 42. – №. 13. – C. 5493-5499.
98. Grise K. M., Davis S. M. Hadley cell expansion in CMIP6 models //Atmospheric Chemistry and Physics. – 2020. – T. 20. – №. 9. – C. 5249-5268.
99. Groisman P. Y. et al. Trends in intense precipitation in the climate record //Journal of climate. – 2005. – T. 18. – №. 9. – C. 1326-1350.
100. Gu G., Adler R. F. Spatial patterns of global precipitation change and variability during 1901–2010 //Journal of Climate. – 2015. – T. 28. – №. 11. – C. 4431-4453.

101. Gulev S.K. et al. (eds.) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change //Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. – Cambridge University Press – 287-422.
102. Haerter J. O., Berg P. Unexpected rise in extreme precipitation caused by a shift in rain type? //Nature Geoscience. – 2009. – T. 2. – №. 6. – C. 372-373.
103. Hardwick Jones R., Westra S., Sharma A. Observed relationships between extreme sub-daily precipitation, surface temperature, and relative humidity //Geophysical Research Letters. – 2010. – T. 37. – №. 22.
104. Harris I. et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset //Scientific data. – 2020. – T. 7. – №. 1. – C. 109.
105. Hawkins E., Sutton R. The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions //Bulletin of the American Meteorological Society. – 2009. – T. 90. – №. 8. – C. 1095-1108.
106. Held I. M., Soden B. J. Robust responses of the hydrological cycle to global warming //Journal of climate. – 2006. – T. 19. – №. 21. – C. 5686-5699.
107. Hénin R. et al. Assigning precipitation to mid-latitudes fronts on sub-daily scales in the North Atlantic and European sector: Climatology and trends //International Journal of Climatology. – 2019. – T. 39. – №. 1. – C. 317-330.
108. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Thépaut J. N. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present //Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS) – 2018. – T. 10.
109. Hodges K. I., Lee R. W., Bengtsson L. A comparison of extratropical cyclones in recent reanalyses ERA-Interim, NASA MERRA, NCEP CFSR, and JRA-25 //Journal of Climate. – 2011. – T. 24. – №. 18. – C. 4888-4906.
110. Holton J. R., Hakim G. J. An introduction to dynamic meteorology. Waltham, MA. – 2013.
111. Horton D. E. et al. Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends //Nature. – 2015. – T. 522. – №. 7557. – C. 465-469.
112. Huang D. et al. The tri-pole relation among daily mean temperature, atmospheric moisture and precipitation intensity over China //Global and Planetary Change. – 2019. – T. 179. – C. 1 - 9.

113. Huang W. et al. Moisture sources for wintertime extreme precipitation events over South China during 1979–2013 //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2018. – T. 123. – №. 13. – C. 6690-6712.
114. Hudson R. D. et al. The total ozone field separated into meteorological regimes–Part II: Northern Hemisphere mid-latitude total ozone trends //Atmospheric Chemistry and Physics. – 2006. – T. 6. – №. 12. – C. 5183-5191.
115. John A. et al. Quantifying CMIP6 model uncertainties in extreme precipitation projections //Weather and Climate Extremes. – 2022. – T. 36. – C. 100435.
116. Kharin V. V. et al. Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble //Climatic change. – 2013. – T. 119. – №. 2. – C. 345-357.
117. Kharyutkina E. et al. Time series analysis of atmospheric precipitation characteristics in Western Siberia for 1979–2018 across different datasets //Atmosphere. – 2022. – T. 13. – №. 2. – C. 189.
118. Khon V. C. et al. Regional changes of precipitation characteristics in Northern Eurasia from simulations with global climate model //Global and Planetary Change. – 2007. – T. 57. – №. 1-2. – C. 118-123.
119. Kim Y. H., Min S. K., Zhang X., Sillmann J., Sandstad M. Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices //Weather and Climate Extremes. – 2020. – T. 29. – C. 100269.
120. Kislov A., Matveeva T., Antipina U. Precipitation Extremes and Their Synoptic Models in the Northwest European Sector of the Arctic during the Cold Season //Atmosphere. – 2022. – T. 13. – №. 7. – C. 1116.
121. Klein C. et al. Combining CMIP data with a regional convection-permitting model and observations to project extreme rainfall under climate change //Environmental Research Letters. – 2021. – T. 16. – №. 10. – C. 104023.
122. Klok E. J., Klein Tank A. M. G. Updated and extended European dataset of daily climate observations //International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society. – 2009. – T. 29. – №. 8. – C. 1182-1191.
123. Knutti R. et al. A climate model projection weighting scheme accounting for performance and interdependence //Geophysical Research Letters. – 2017. – T. 44. – №. 4. – C. 1909-1918.

124. Kumar S. et al. Revisiting trends in wetness and dryness in the presence of internal climate variability and water limitations over land //Geophysical Research Letters. – 2015. – T. 42. – №. 24. – C. 10,867-10,875.
125. Lavers D. A. et al. An evaluation of ERA5 precipitation for climate monitoring //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2022. – T. 148. – №. 748. – C. 3152 - 3165.
126. Lenderink G. et al. Reply to comments on “Temperature-extreme precipitation scaling: A two-way causality?” //International Journal of Climatology. – 2018. – T. 38. – №. 12. – C. 4664-4666.
127. Lenderink G. et al. Super-Clausius–Clapeyron scaling of extreme hourly convective precipitation and its relation to large-scale atmospheric conditions //Journal of Climate. – 2017. – T. 30. – №. 15. – C. 6037-6052.
128. Lenderink G., Van Meijgaard E. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes //Nature Geoscience. – 2008. – T. 1. – №. 8. – C. 511 - 514.
129. Li X. et al. Decadal trends of global precipitation in the recent 30 years //Atmospheric Science Letters. – 2015. – T. 16. – №. 1. – C. 22-26.
130. Long K. et al. Higher temperature enhances spatiotemporal concentration of rainfall //Journal of Hydrometeorology. – 2021. – T. 22. – №. 12. – C. 3159-3169.
131. Lu J., Deser C., Reichler T. Cause of the widening of the tropical belt since 1958 //Geophysical Research Letters. – 2009. – T. 36. – №. 3.
132. Martel J. L. et al. Climate change and rainfall intensity–duration–frequency curves: Overview of science and guidelines for adaptation //Journal of Hydrologic Engineering. – 2021. – T. 26. – №. 10. – C. 03121001.
133. Martel J. L., Mailhot A., Brissette F. Global and regional projected changes in 100-yr subdaily, daily, and multiday precipitation extremes estimated from three large ensembles of climate simulations //Journal of Climate. – 2020. – T. 33. – №. 3. – C. 1089-1103.
134. Masson-Delmotte V. et al. (eds.) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, IPCC – 2021. – pp. 3–32.

135. McVicar T. R. et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation //Journal of Hydrology. – 2012. – T. 416. – C. 182-205.
136. Meehl G. A. et al. The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research //Bulletin of the American meteorological society. – 2007. – T. 88. – №. 9. – C. 1383 - 1394.
137. Meredith E. P. et al. Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme //Nature Geoscience. – 2015a. – T. 8. – №. 8. – C. 615-619.
138. Meredith E. P. et al. Evidence for added value of convection-permitting models for studying changes in extreme precipitation //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2015b. – T. 120. – №. 24. – C. 12500-12513.
139. Min S. K. et al. Human contribution to more-intense precipitation extremes //Nature. – 2011. – T. 470. – №. 7334. – C. 378-381.
140. Mishra V., Wallace J. M., Lettenmaier D. P. Relationship between hourly extreme precipitation and local air temperature in the United States //Geophysical Research Letters. – 2012. – T. 39. – №. 16.
141. Moncrieff M. W., Miller M. J. The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1976. – T. 102. – №. 432. – C. 373-394.
142. Myhre G. et al. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming //Scientific reports. – 2019. – T. 9. – №. 1. – C. 16063.
143. Nogueira M. Inter-comparison of ERA-5, ERA-interim and GPCP rainfall over the last 40 years: Process-based analysis of systematic and random differences //Journal of Hydrology. – 2020. – T. 583. – C. 124632.
144. O’Gorman P. A. Sensitivity of tropical precipitation extremes to climate change //Nature Geoscience. – 2012. – T. 5. – №. 10. – C. 697-700.
145. O’Gorman P. A., Schneider T. Scaling of precipitation extremes over a wide range of climates simulated with an idealized GCM //Journal of Climate. – 2009. – T. 22. – №. 21. – C. 5676-5685.
146. Pall P., Allen M. R., Stone D. A. Testing the Clausius–Clapeyron constraint on changes in extreme precipitation under CO₂ warming //Climate Dynamics. – 2007. – T. 28. – №. 4. – C. 351-363.

147. Park I. H., Min S. K. Role of convective precipitation in the relationship between subdaily extreme precipitation and temperature //Journal of Climate. – 2017. – T. 30. – №. 23. – C. 9527- 9537.
148. Petoukhov V., Semenov V. A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2010. – T. 115. – №. D21.
149. Pfahl S., O’Gorman P. A., Fischer E. M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation //Nature Climate Change. – 2017. – T. 7. – №. 6. – C. 423-427.
150. Pierce D.W., Barnett T.P., Santer B.D., Gleckler P.J. Selecting global climate models for regional climate change studies //Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009. T. 106. №. 21. C. 8441-8446.
151. Rayner N. A., Parker D. E., Horton E. B., Folland C. K., Alexander L. V., Rowell D. P., Kent E. C., Kaplan A. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2003. – T. 108. – №. D14.
152. Ren L. et al. Global precipitation trends in 1900–2005 from a reconstruction and coupled model simulations //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2013. – T. 118. – №. 4. – C. 1679-1689.
153. Rodell M. et al. The observed state of the water cycle in the early twenty-first century //Journal of Climate. – 2015. – T. 28. – №. 21. – C. 8289-8318.
154. Roeckner E. et al. The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description. – 2003.
155. Seager R. et al. Mechanisms of Winter precipitation variability in the European–Mediterranean region associated with the North Atlantic oscillation //Journal of Climate. – 2020. – T. 33. – №. 16. – C. 7179-7196.
156. Seager R. et. al. Climate variability and change of Mediterranean-type climates //Journal of Climate. – 2019. – T. 32. – №. 10. – C. 2887-2915.
157. Seager R., Naik N., Vecchi G. A. Thermodynamic and dynamic mechanisms for large-scale changes in the hydrological cycle in response to global warming //Journal of Climate. – 2010. – T. 23. – №. 17. – C. 4651-4668.

158. Seidel D. J. et al. Widening of the tropical belt in a changing climate //Nature geoscience. – 2008. – T. 1. – №. 1. – C. 21.
159. Semenov V., Bengtsson L. Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM //Climate Dynamics. – 2002. – T. 19. – №. 2. – C. 123-140.
160. Semmler T. et al. Seasonal atmospheric responses to reduced Arctic sea ice in an ensemble of coupled model simulations //Journal of Climate. – 2016. – T. 29. – №. 16. – C. 5893- 5913.
161. Shepherd T. G. The dynamics of temperature extremes //Nature. – 2015. – T. 522. – №. 7557. – C. 425-427.
162. Sherwood S. C. et al. Relative humidity changes in a warmer climate //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2010. – T. 115. – №. D9.
163. Sillmann J. et al. Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities //Weather and climate extremes. – 2017. – T. 18. – C. 65-74.
164. Simmons A. J. et al. Low-frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature, and precipitation: Inferences from reanalyses and monthly gridded observational data sets //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2010. – T. 115. – №. D1.
165. Stefanon M., D'Andrea F., Drobinski P. Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region //Environmental Research Letters. – 2012. – T. 7. – №. 1. – C. 014023.
166. Sugiyama M., Shiogama H., Emori S. Precipitation extreme changes exceeding moisture content increases in MIROC and IPCC climate models //Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2010. – T. 107. – №. 2. – C. 571-575.
167. Sun F., Roderick M. L., Farquhar G. D. Changes in the variability of global land precipitation //Geophysical Research Letters. – 2012. – T. 39. – №. 19.
168. Sun Q. et al. A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation //Journal of Climate. – 2021. – T. 34. – №. 1. – C. 243-258.
169. Sun Q. et al. A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons //Reviews of Geophysics. – 2018. – T. 56. – №. 1. – C. 79-107.
170. Tarek M., Brissette F. P., Arsenault R. Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America //Hydrology and Earth System Sciences. – 2020. – T. 24. – №. 5. – C. 2527-2544.

171. Tian B. et al. Global scaling of precipitation extremes using near-surface air temperature and dew point temperature //Environmental Research Letters. – 2023.
172. Tilinina N., Gavrikov A., Gulev S. K. Association of the North Atlantic surface turbulent heat fluxes with midlatitude cyclones //Monthly Weather Review. – 2018. – T. 146. – №. 11. – C. 3691-3715.
173. Traxl D. et al. The role of cyclonic activity in tropical temperature-rainfall scaling //Nature communications. – 2021. – T. 12. – №. 1. – C. 6732.
174. Trenberth K. E. Changes in precipitation with climate change //Climate research. – 2011. – T. 47. – №. 1-2. – C. 123-138.
175. Twardosz R., Walanus A., Guzik I. Warming in Europe: recent trends in annual and seasonal temperatures //Pure and Applied Geophysics. – 2021. – T. 178. – №. 10. – C. 4021- 4032.
176. Utsumi N. et al. Does higher surface temperature intensify extreme precipitation? //Geophysical research letters. – 2011. – T. 38. – №. 16.
177. Van den Besselaar E. J. M., Klein Tank A. M. G., Buishand T. A. Trends in European precipitation extremes over 1951–2010 //International Journal of Climatology. – 2013. – T. 33. – №. 12. – C. 2682-2689.
178. Van Vuuren D. P. et al. A new scenario framework for climate change research: scenario matrix architecture //Climatic change. – 2014. – T. 122. – C. 373-386.
179. Vargas Godoy M. R. et al. The global water cycle budget: A chronological review //Surveys in Geophysics. – 2021. – T. 42. – №. 5. – C. 1075-1107.
180. Vogel M. M., Hauser M., Seneviratne S. I. Projected changes in hot, dry and wet extreme events' clusters in CMIP6 multi-model ensemble //Environmental Research Letters. – 2020. – T. 15. – №. 9. – C. 094021.
181. Volosciuk C., Maraun D., Semenov V. A., Park W. Extreme precipitation in an atmosphere general circulation model: impact of horizontal and vertical model resolutions //Journal of Climate. – 2015. – T. 28. – №. 3. – C. 1184-1205.
182. Volosciuk C., Maraun D., Semenov V. A., Tilinina N., Gulev S. K., Latif M. Rising mediterranean sea surface temperatures amplify extreme summer precipitation in central Europe //Scientific reports. – 2016. – T. 6. – C. 32450.
183. Voskresenskaya E., Vyshkvarkova E. Extreme precipitation over the Crimean peninsula //Quaternary International. – 2016. – T. 409. – C. 75-80.

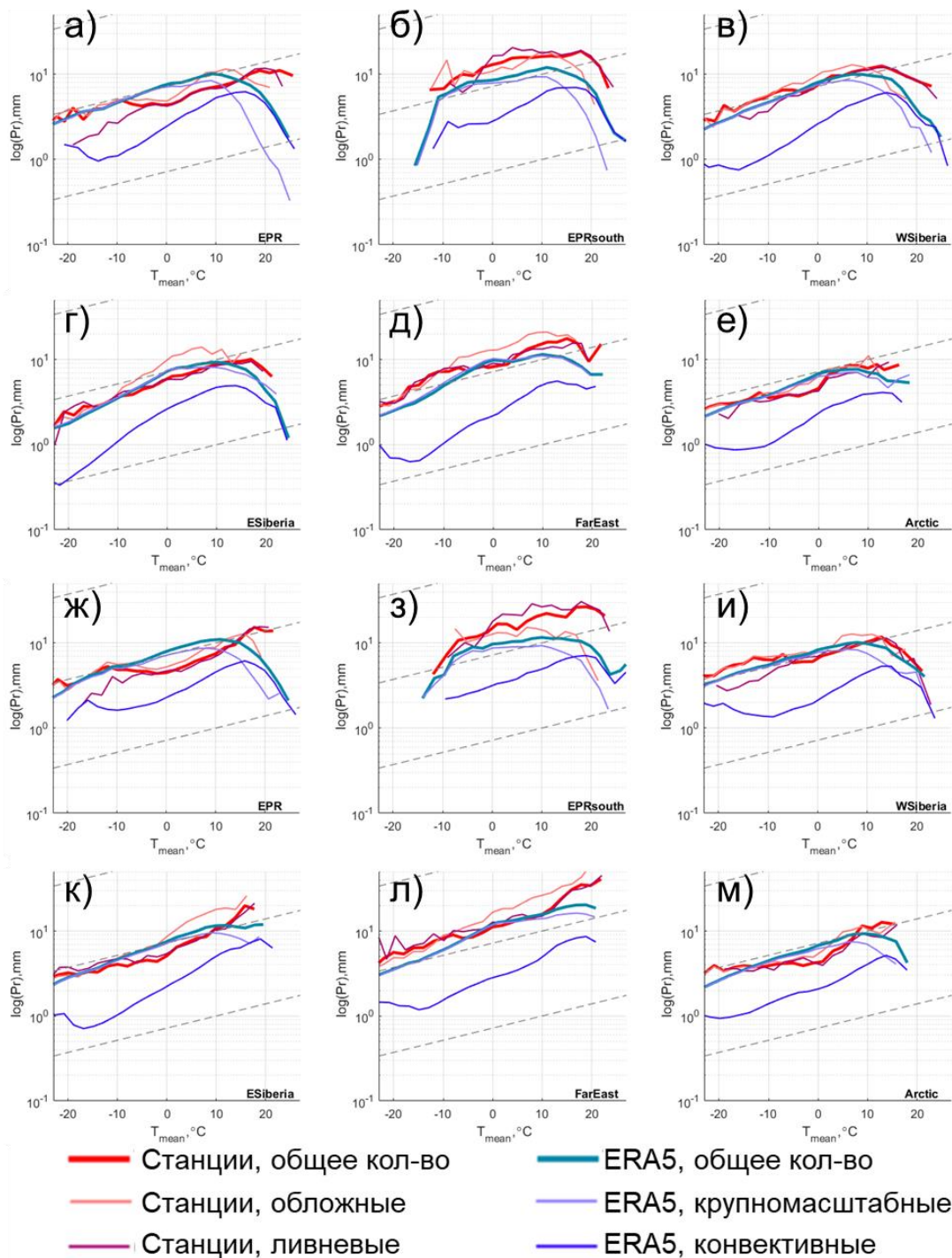
184. Vyshkvarkova E. Changes in extreme precipitation over the North Caucasus and the Crimean Peninsula during 1961–2018 //QJ Hung. Meteorol. Serv., 2021. T. 125. C. 321-336.
185. Vyshkvarkova E. V., Voskresenskaya E. N. Changes of extreme precipitation in Southern Russia //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2018. – T. 107. – №. 1. – C. 012044.
186. Wang G. et al. The peak structure and future changes of the relationships between extreme precipitation and temperature //Nature Climate Change. – 2017a. – T. 7. – №. 4. – C. 268-274.
187. Wang H., Sun F., Liu W. The dependence of daily and hourly precipitation extremes on temperature and atmospheric humidity over China //Journal of Climate. – 2018. – T. 31. – №. 21. – C. 8931-8944.
188. Wang Z. et al. Atmospheric moisture budget and its regulation on the variability of summer precipitation over the Tibetan Plateau //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2017b. – T. 122. – №. 2. – C. 614-630.
189. Wang Z. et al. Roles of atmospheric aerosols in extreme meteorological events: A systematic review //Current Pollution Reports. – 2022. – T. 8. – №. 2. – C. 177-188.
190. Ward E. et al. Evaluation of precipitation products over complex mountainous terrain: A water resources perspective //Advances in Water Resources. – 2011. – T. 34. – №. 10. – C. 1222-1231.
191. Westra S. et al. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall //Reviews of Geophysics. – 2014. – T. 52. – №. 3. – C. 522-555.
192. Yang D., Yang Y., Xia J. Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review //Geography and Sustainability. – 2021. – T. 2. – №. 2. – C. 115-122.
193. Yarinich Y. I. et al. 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. – IOP Publishing, 2019. – T. 386. – №. 1. – C. 012051.
194. Yin X., Gruber A., Arkin P. Comparison of the GPCP and CMAP merged gauge–satellite monthly precipitation products for the period 1979–2001 //Journal of Hydrometeorology. – 2004. – T. 5. – №. 6. – C. 1207-1222.
195. Zaitchik B. F. et al. Wetting and drying trends under climate change //Nature Water. – 2023. – C. 1-12.

196. Zemp M., Hoelzle M., Haeberli W. Six decades of glacier mass-balance observations: a review of the worldwide monitoring network //Annals of Glaciology. – 2009. – Т. 50. – №. 50. – С. 101-111.
197. Zhang X. et al. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data //Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change. – 2011. – Т. 2. – №. 6. – С. 851-870.
198. Zhang Y. et al. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components //Scientific reports. – 2016. – Т. 6. – №. 1. – С. 19124.
199. Zolina O. et al. Seasonally dependent changes of precipitation extremes over Germany since 1950 from a very dense observational network //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2008. – Т. 113. – №. D6.
200. Zolotokrylin A., Cherenkova E. Seasonal changes in precipitation extremes in Russia for the last several decades and their impact on vital activities of the human population //Geography, environment, sustainability. – 2017. – Т. 10. – №. 4. – С. 69-82.
201. Zveryaev I. I., Gulev S. K. Seasonality in secular changes and interannual variability of European air temperature during the twentieth century //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2009. – Т. 114. – №. D2.
202. ВНИИГМИ-МЦД meteo.ru
203. MetOffice Climate Dashboard <https://climate.metoffice.cloud/temperature.html>
204. CEDA Archive <https://data.ceda.ac.uk/badc/cmip6/data/CMIP6>

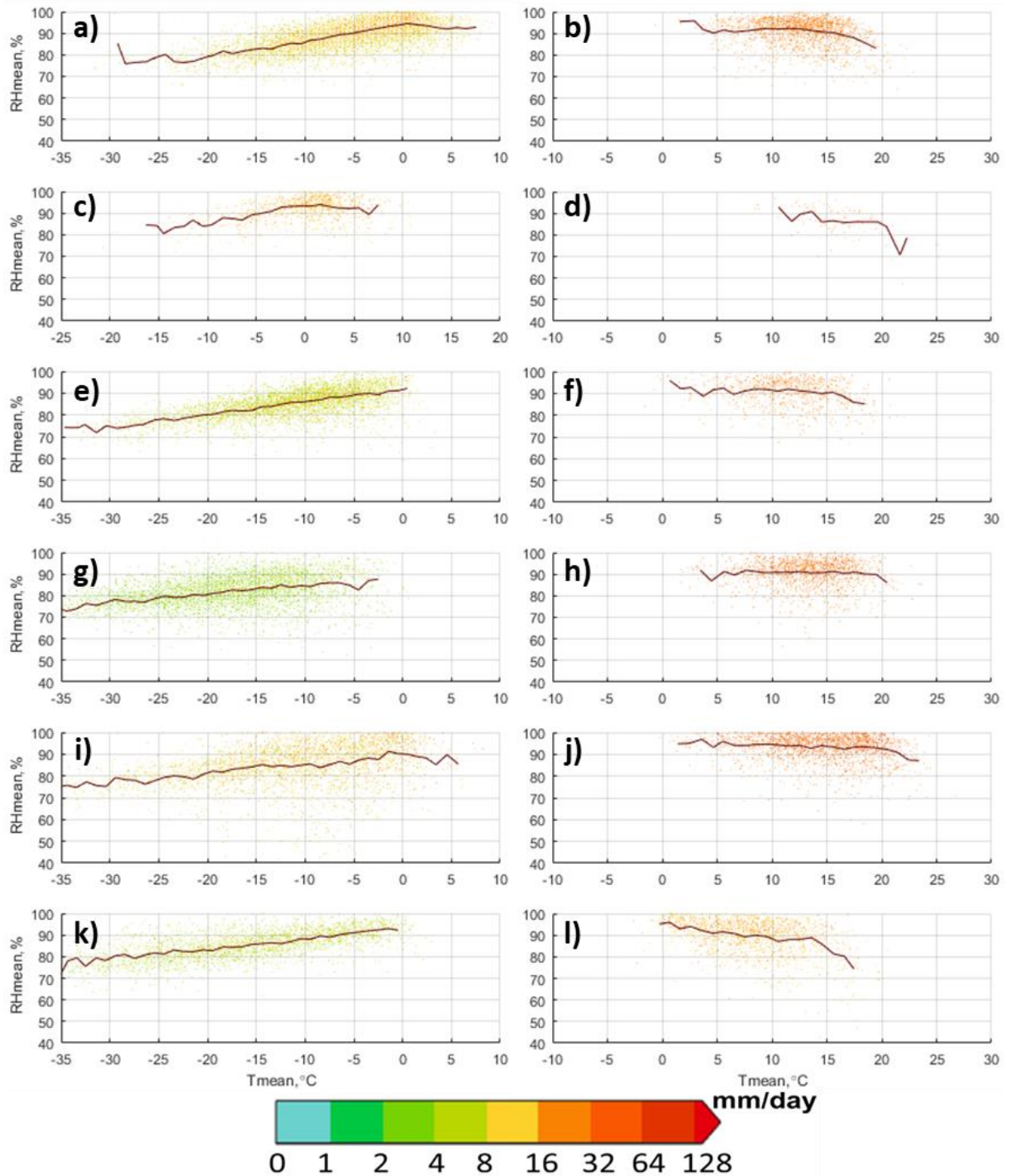
Приложения

Приложение 1.

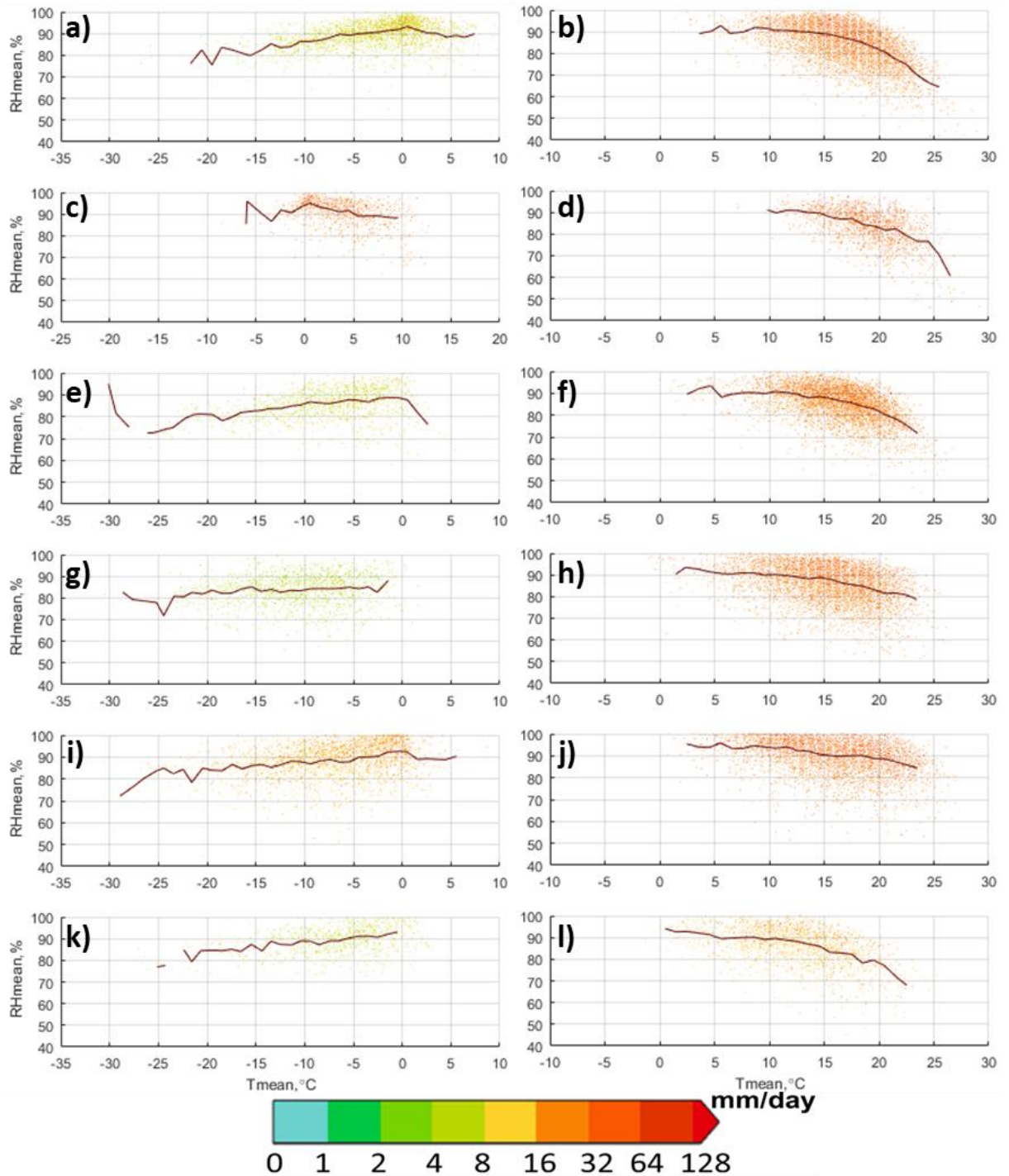
Значения 95-го перцентиля суточных сумм осадков разных типов в логарифмической шкале как функция средней температуры весной (а-е) и осенью (ж-м) по данным метеорологических станций (красные линии) и реанализа ERA5 (синие линии) для регионов России: Европейской части (а, ж), юга ЕТР (б, з), Западной Сибири (в, и), Восточной Сибири (г, к), Дальнего Востока (д, л) и Арктики (е, м). Пунктирными линиями показаны значения, соответствующие соотношению Клаузиуса - Клапейрона.



Зависимость относительной влажности от температуры в день выпадения экстремальных крупномасштабных осадков (интенсивность осадков показана цветом) зимой (справа) и летом (слева) по данным метеорологических станций для регионов России: Европейской части (a, b), юга ЕТР (c, d), Западной Сибири (e, f), Восточной Сибири (g, h), Дальнего Востока (i, j) и Арктики (k, l).

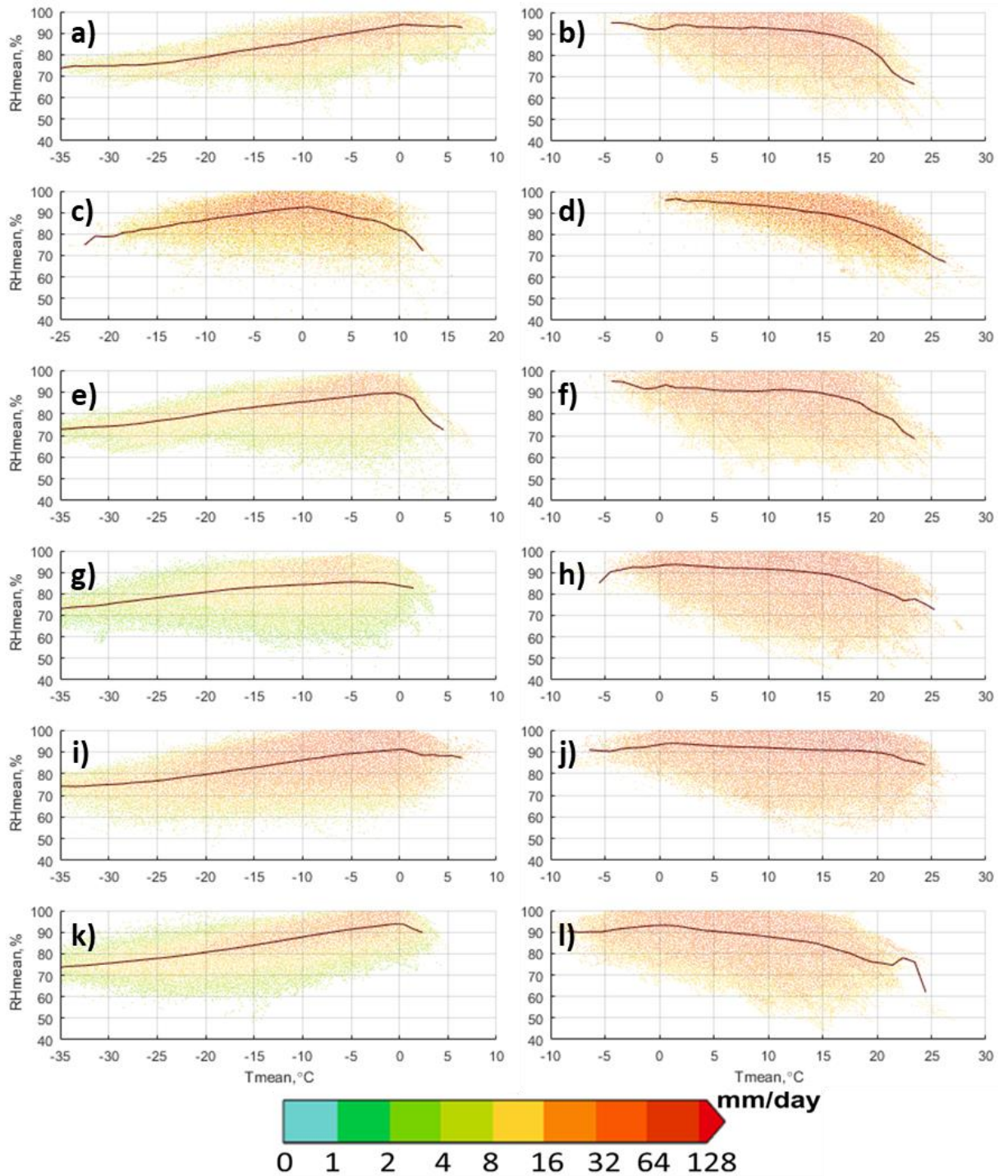


Зависимость относительной влажности от температуры в день выпадения экстремальных конвективных осадков (интенсивность осадков показана цветом) зимой (справа) и летом (слева) по данным метеорологических станций для регионов России: Европейской части (a, b), юга ЕТР (c, d), Западной Сибири (e, f), Восточной Сибири (g, h), Дальнего Востока (i, j) и Арктики (k, l).

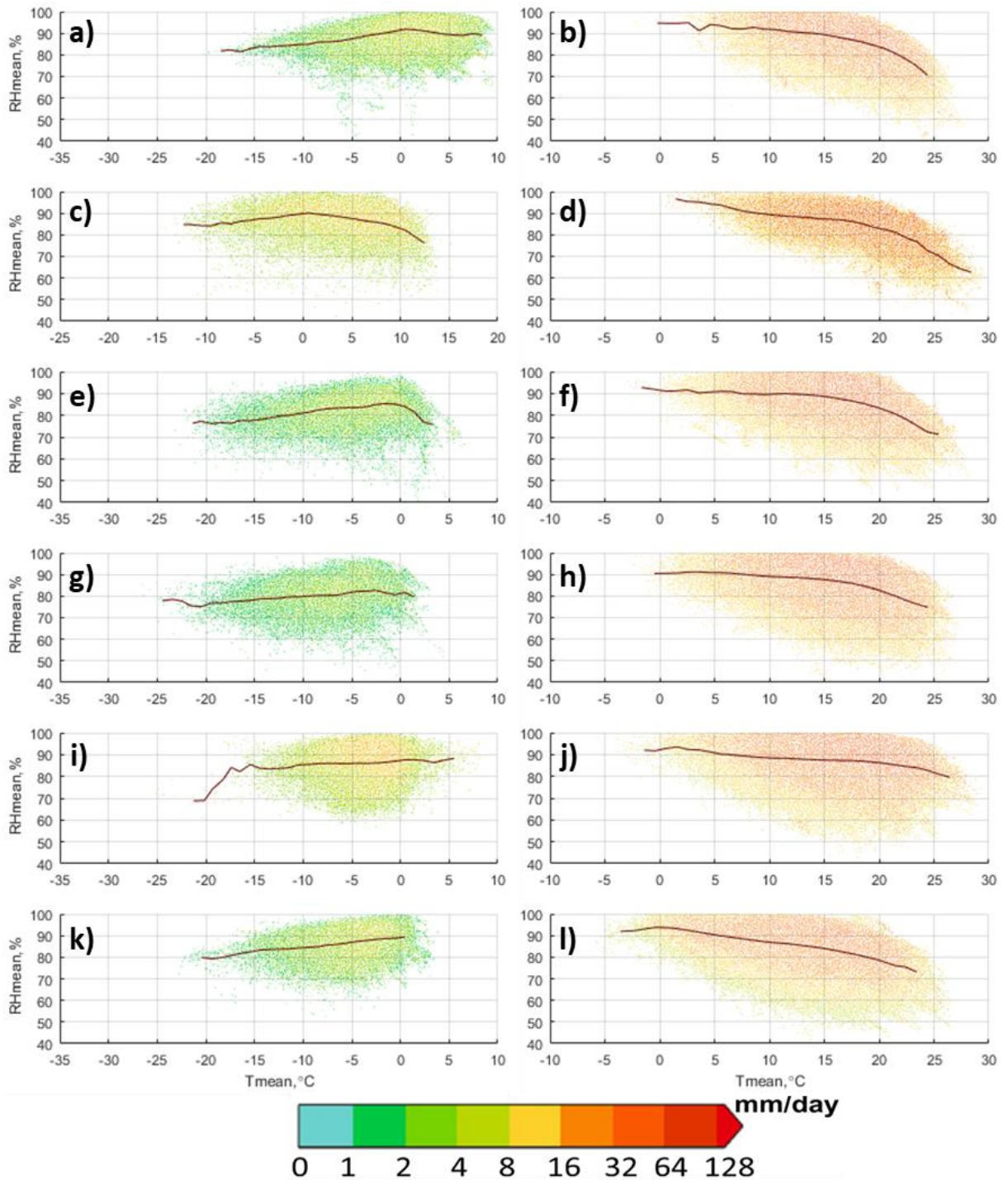


Приложение 4.

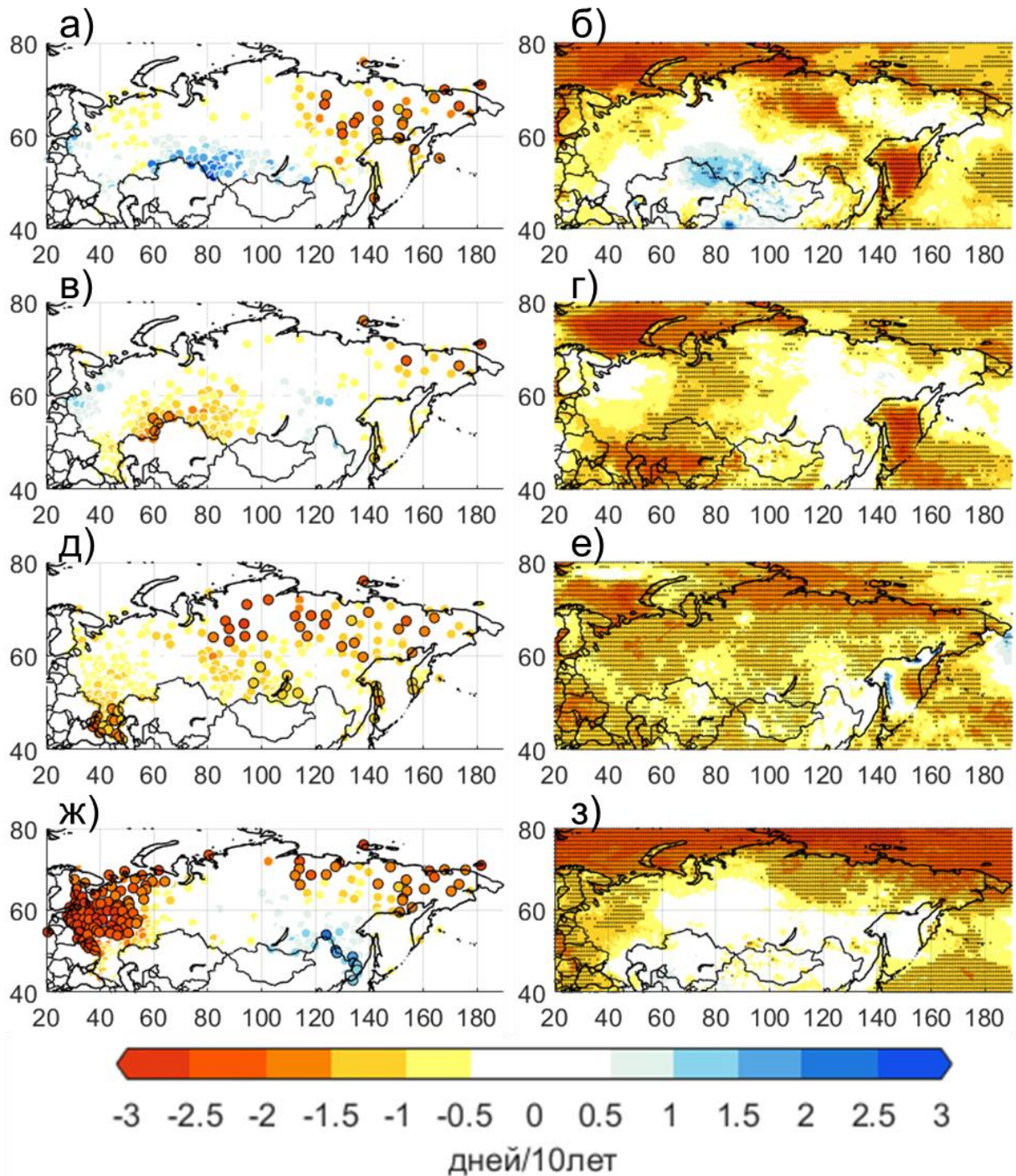
Зависимость относительной влажности от температуры в день выпадения экстремальных крупномасштабных осадков (интенсивность осадков показана цветом) зимой (справа) и летом (слева) по реанализа ERA5 для регионов России: Европейской части (a, b), юга ЕТР (c, d), Западной Сибири (e, f), Восточной Сибири (g, h), Дальнего Востока (i, j) и Арктики (k, l).



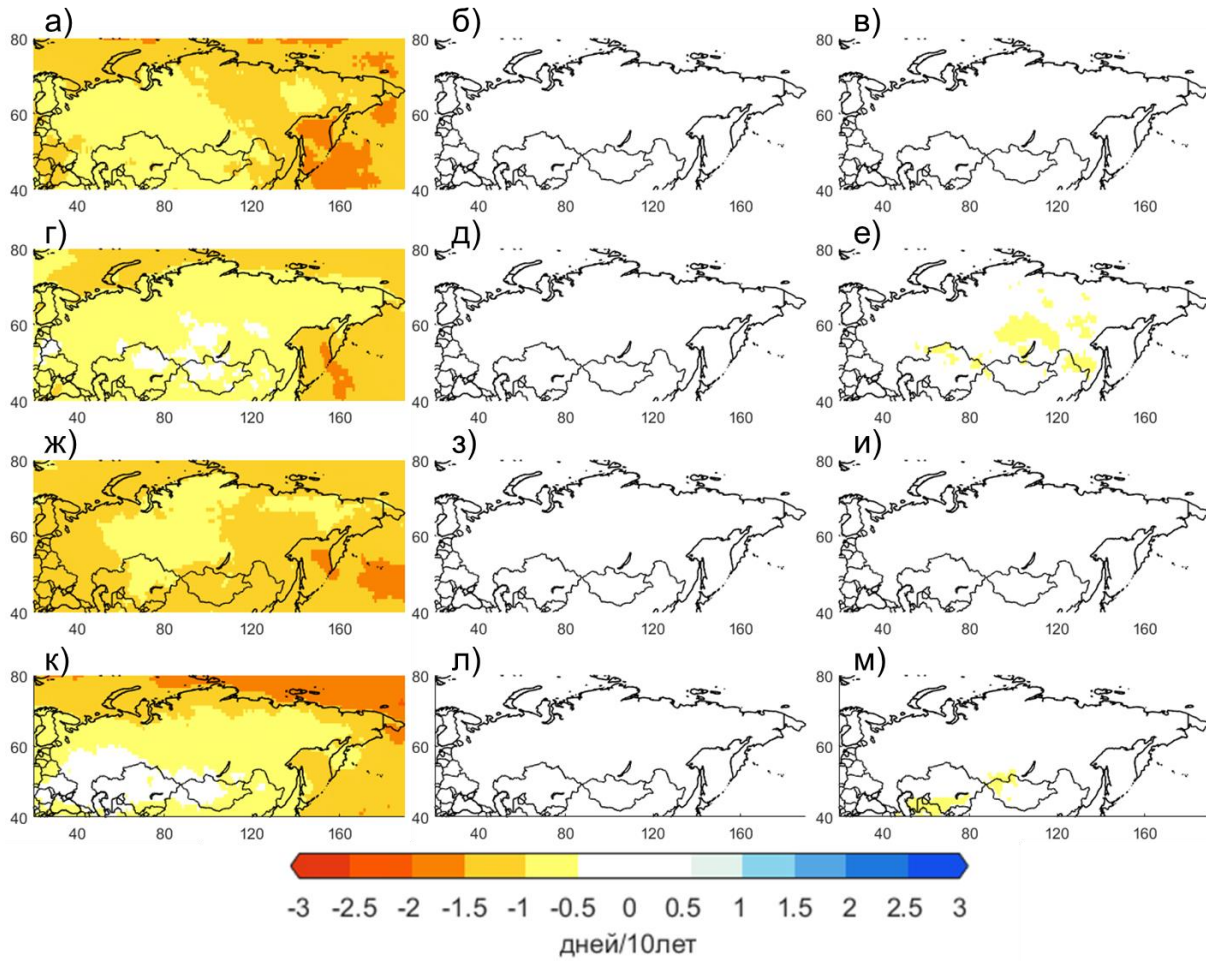
Зависимость относительной влажности от температуры в день выпадения экстремальных конвективных осадков (интенсивность осадков показана цветом) зимой (справа) и летом (слева) по реанализа ERA5 для регионов России: Европейской части (a, b), юга ЕТР (c, d), Западной Сибири (e, f), Восточной Сибири (g, h), Дальнего Востока (i, j) и Арктики (k, l).



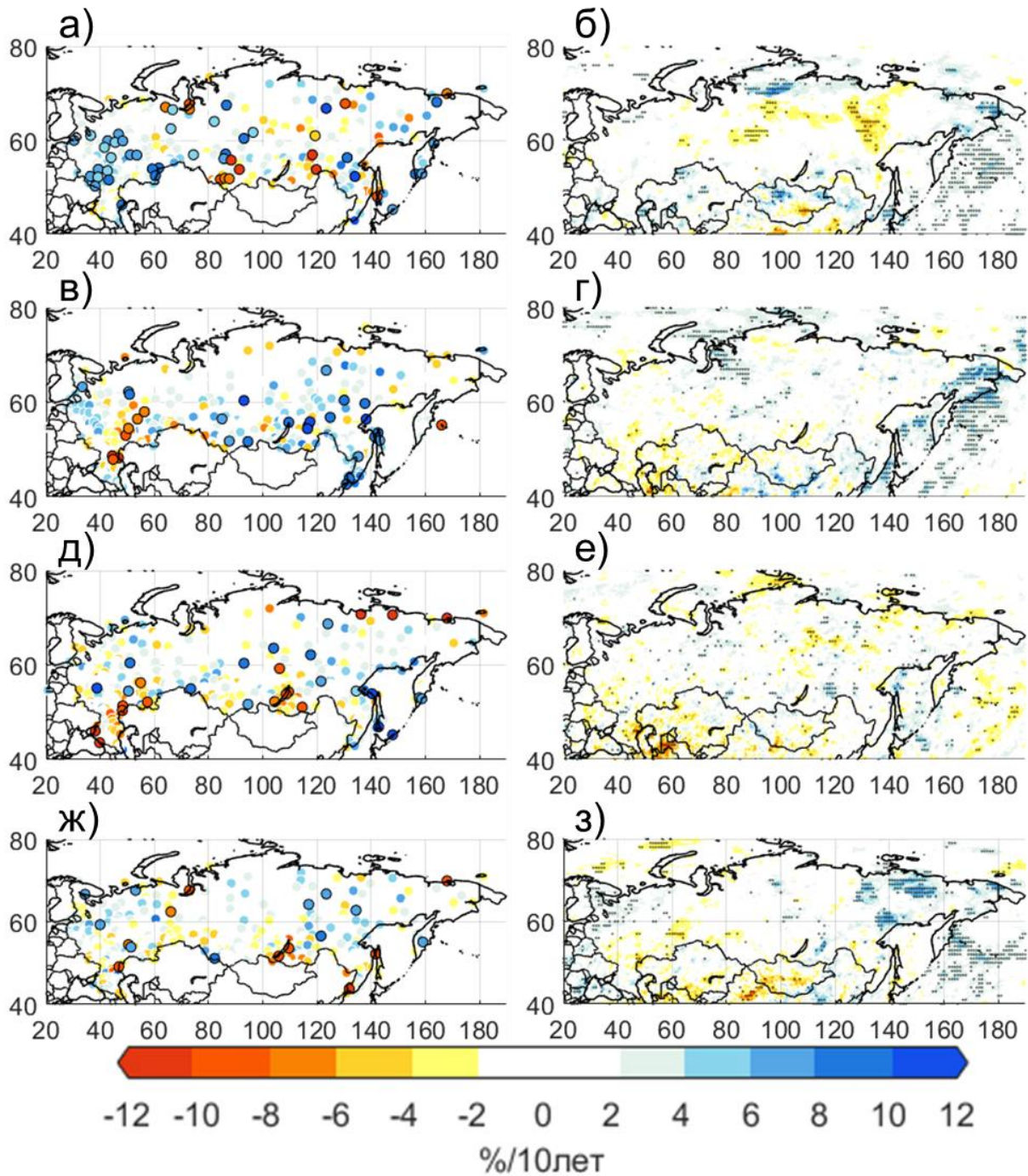
Коэффициенты линейного тренда повторяемости дней с экстремально низкими (ниже 5%-го перцентиля в 1981-2010 гг.) температурами воздуха на 2 м (в дн./10 лет) по метеорологическим станциям (а, в, д, ж) и реанализу ERA5 (б, г, е, з) в 1991 - 2020 гг. для зимы (а, б), весны (в, г), лета (д, е) и осени (ж, з). Статистически значимые на уровне 0.05 тренды показаны жирными контурами для станций и штриховкой для реанализа.



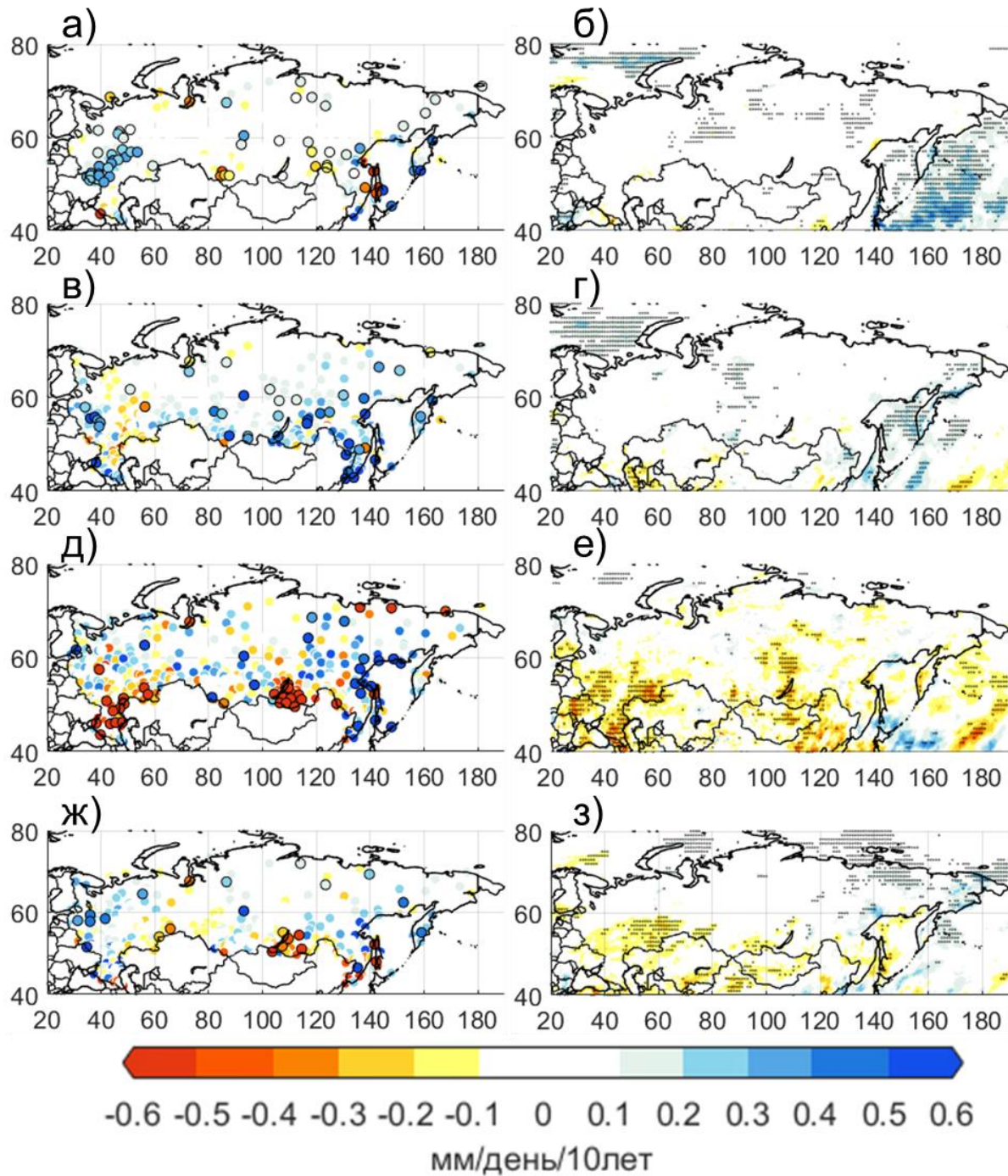
Средние по моделям СМIP6 коэффициенты линейного тренда повторяемости дней с экстремально низкими (ниже 5%-го перцентиля в 1981-2010 гг.) температурами воздуха на 2 м (в дн./10 лет) по эксперименту historical и ssp245 (а, г, ж, к), в 2051-2080 по сценариям ssp245 (б, д, з, л) и ssp585 (в, е, и, м) зимой (а-в), весной (г-е), летом (ж-и) и осенью (к-м).



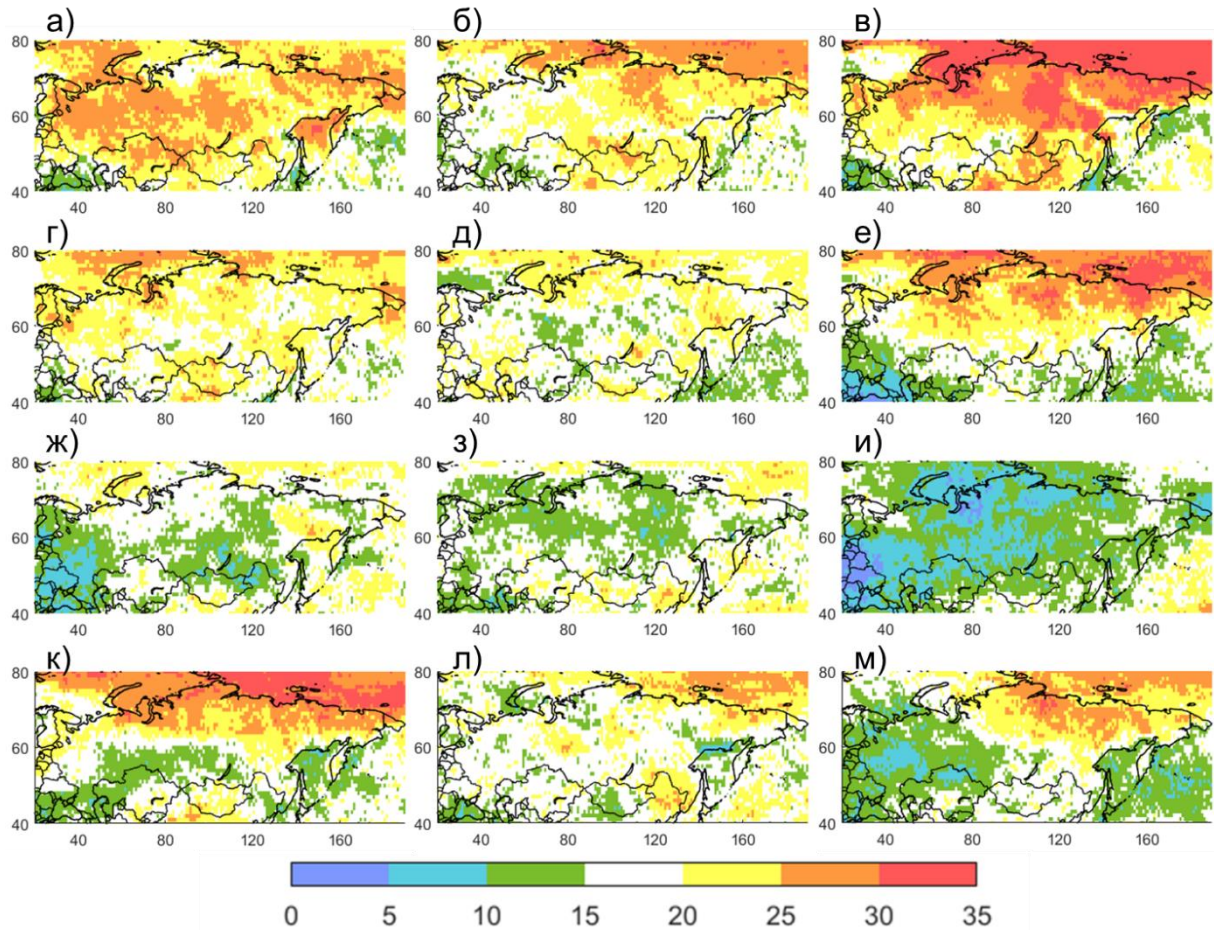
Коэффициенты линейного тренда вклада экстремальных осадков в сезонные суммы (в %/10 лет) по метеорологическим станциям (а, в, д, ж) и реанализу ERA5 (б, г, е, з) за период 1991-2020 гг. для зимы (а, б), весны (в, г), лета (д, е) и осени (ж, з). Статистически значимые на уровне 0.05 тренды показаны жирными контурами для станций и штриховкой для реанализа.



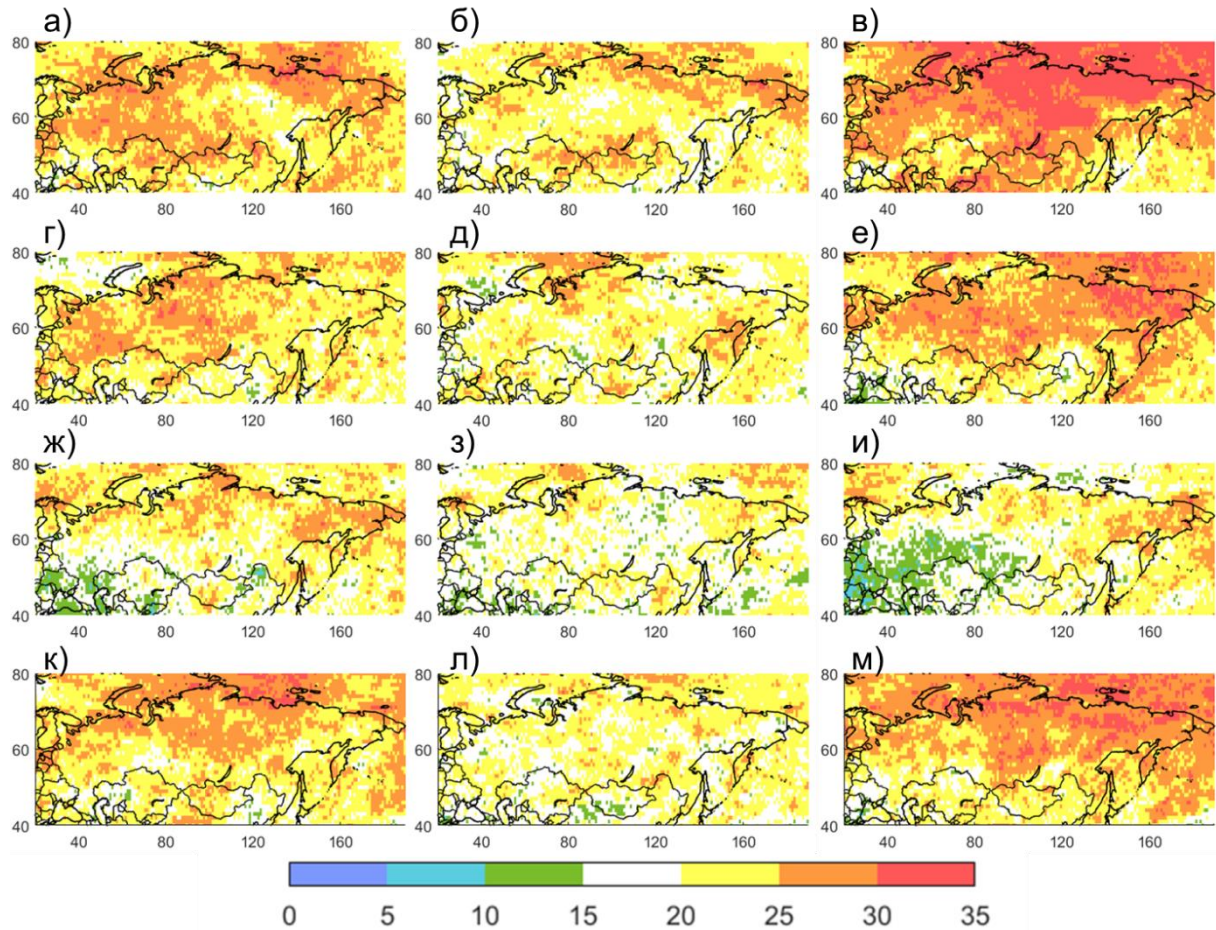
Коэффициенты линейного тренда интенсивности осадков (в мм/день/10 лет) по метеорологическим станциям (а, в, д, ж) и реанализу ERA5 (б, г, е, з) за период 1991 - 2020 гг. для зимы (а, б), весны (в, г), лета (д, е) и осени (ж, з). Статистически значимые на уровне 0.05 тренды показаны жирными контурами для станций и штриховкой для реанализа.



Количество моделей CMIP6 с положительными значениями коэффициентов линейных трендов повторяемости дней с осадками (выше 0.1 мм/день) в 1991-2020 гг. по эксперименту historical и ssp245 (а, г, ж, л), в 2051-2080 по сценариям ssp245 (б, д, з, л) и ssp585 (в, е, и, м) зимой (а-в), весной (г-е), летом (ж-и) и осенью (к-м).



Количество моделей CMIP6 с положительными значениями коэффициентов линейных трендов повторяемости дней с экстремальными осадками в 1991-2020 гг. по эксперименту historical и ssp245 (а, г, ж, л), в 2051-2080 по сценариям ssp245 (б, д, з, л) и ssp585 (в, е, и, м) зимой (а-в), весной (г-е), летом (ж-и) и осенью (к-м).



Результаты сравнения среднемесячных значений температуры по CRU TS с метеостанциями в 1979-2018 гг. (R – коэффициент корреляции, RMS – среднеквадратическое отклонение, Δ – разница между результатом интерполяции и станционными данными, β – коэффициент линейного тренда по CRU TS). Жирным шрифтом выделены тренды, значимые на уровне 0.05.

Станции	R	Δ , °C	RMS (Δ), °C	β , °C/10 лет				
				Год	Зима	Весна	Лето	Осень
Таганрог	0.998	0.38	0.73	0.52	0.27	0.59	0.70	0.52
Ростов-на-Дону	0.997	0.52	0.75	0.51	0.28	0.58	0.69	0.50
Приморско-Ахтарск	0.997	0.23	0.71	0.50	0.27	0.56	0.67	0.51
Краснодар, Круглик	0.994	0.53	1.12	0.46	0.20	0.49	0.66	0.47
Ставрополь	0.995	0.73	0.97	0.38	0.13	0.38	0.64	0.35
Анапа, МГ	0.993	-0.67	1.10	0.50	0.34	0.49	0.66	0.49
Армавир	0.995	0.38	0.87	0.36	0.10	0.35	0.64	0.35
Минеральные воды	0.994	-0.58	1.01	0.45	0.25	0.45	0.69	0.41
Буденновск	0.996	-0.24	1.02	0.43	0.25	0.44	0.64	0.38
Сочи	0.989	-2.51	1.39	0.48	0.29	0.42	0.69	0.51
Красная поляна	0.991	-3.37	1.17	0.46	0.27	0.40	0.68	0.48
Зеленчукская	0.992	-1.97	1.36	0.39	0.18	0.35	0.65	0.38
Кисловодск	0.992	-2.80	1.80	0.44	0.25	0.43	0.69	0.41
Шаджатмаз	0.976	0.47	3.35	0.44	0.25	0.42	0.69	0.41
Клухорский перевал	0.985	-4.25	2.88	0.41	0.23	0.35	0.65	0.40
Владикавказ	0.992	-3.91	1.61	0.38	0.27	0.39	0.54	0.33
Грозный	0.996	-0.01	0.90	0.34	0.15	0.40	0.51	0.29
Гудермес	0.996	-0.64	0.82	0.32	0.11	0.38	0.48	0.29
Сулак	0.980	0.61	3.40	0.30	0.11	0.34	0.44	0.31
Буйнакск	0.995	-2.80	1.16	0.26	0.02	0.31	0.40	0.30

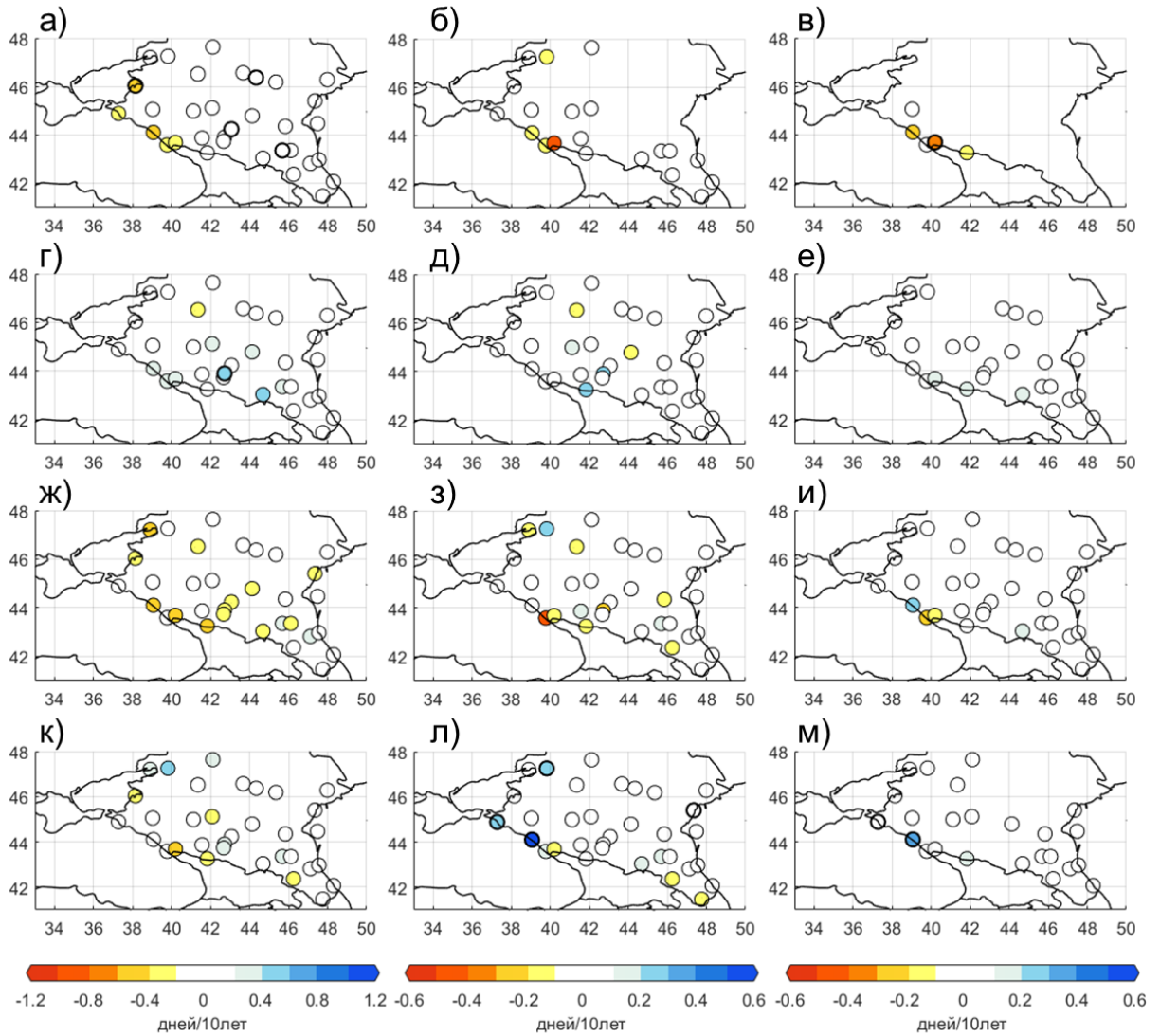
Результаты сравнения среднемесячных сумм осадков (мм/месяц) CRU TS с метеостанциями в 1979-2018 гг. (R – коэффициент корреляции, RMS – среднеквадратическое отклонение, Δ – разница между результатом интерполяции и станционными данными, β – коэффициент линейного тренда по CRU TS). Жирным шрифтом выделены тренды, значимые на уровне 0.05.

Станции	R	Δ , мм	RMS (Δ), мм	β , [мм/мес]/10 лет				
				Год	Зима	Весна	Лето	Осень
Таганрог	0.98	39.68	27.84	-0.37	1.03	-0.23	-6.07	3.81
Ростов-на-Дону	0.88	1.07	18.17	-0.28	-0.71	-0.97	-3.20	3.77
Приморско-Ахтарск	0.92	0.03	24.48	0.59	0.12	2.80	-1.71	1.17
Краснодар, Круглик	0.96	22.37	31.59	0.85	1.29	2.50	-0.08	-0.32
Ставрополь	0.99	-13.17	33.62	0.06	-0.11	3.23	-2.32	-0.55
Анапа, МГ	0.91	11.08	41.70	0.54	-1.24	1.93	0.97	0.50
Армавир	0.78	-62.94	69.53	-0.64	-0.63	2.41	-2.92	-1.42
Минеральные воды	0.75	-3.71	31.00	0.68	1.87	2.39	-2.36	0.83
Буденновск	0.66	-4.88	25.12	1.04	1.63	4.14	-2.49	0.89
Сочи	0.93	66.02	52.43	-1.40	-3.11	4.32	-4.77	-2.03
Красная поляна	0.92	-36.96	55.12	-2.09	-4.37	2.61	-4.52	-2.08
Зеленчукская	0.71	-84.05	88.83	-0.41	0.18	2.62	-4.89	0.42
Кисловодск	0.81	1.90	37.76	0.36	1.83	1.91	-3.49	1.18
Шаджатмаз	0.85	13.35	30.36	0.17	1.70	1.67	-4.01	1.34
Клухорский перевал	0.71	35.84	42.20	-0.41	-0.57	2.21	-4.48	1.19
Владикавказ	0.95	-75.12	95.02	2.07	-0.85	8.17	-3.04	4.01
Сулак	0.83	-35.29	39.48	1.74	-0.08	4.23	0.93	1.87
Гудермес	0.82	0.69	20.30	1.26	0.27	3.38	0.41	0.99
Дербент	0.85	33.05	37.44	1.79	-0.28	5.51	-1.53	3.45
Буйнакск	0.87	14.27	38.99	1.30	1.49	5.51	-1.08	-0.72

Результаты сравнения среднемесячного количества осадков (мм/день) ГРСП с метеостанциями в 1979-2018 гг. (R – коэффициент корреляции, RMS – среднеквадратическое отклонение, Δ – разница между результатом интерполяции и станционными данными, β – коэффициент линейного тренда по ГРСП). Жирным шрифтом выделены тренды, значимые на уровне 0.05.

Станции	R	Δ , мм	RMS (Δ), мм	β , [мм/мес]/10 лет				
				Год	Зима	Весна	Лето	Осень
Таганрог	0.76	0.68	0.76	-0.07	-0.14	-0.01	-0.09	-0.03
Ростов-на-Дону	0.79	0.50	0.69	-0.07	-0.14	0.00	-0.10	-0.03
Приморско-Ахтарск	0.76	0.72	0.79	-0.06	-0.14	0.01	-0.11	0.00
Краснодар, Круглик	0.76	0.80	0.92	-0.10	-0.18	0.00	-0.15	-0.06
Ставрополь	0.70	0.97	0.82	-0.05	-0.12	0.07	-0.14	-0.02
Анапа, МГ	0.74	0.91	0.88	0.01	0.04	0.07	-0.10	0.04
Туапсе	0.84	-0.69	1.46	-0.11	-0.18	0.01	-0.17	-0.09
Армавир	0.66	1.09	1.00	-0.08	-0.17	0.04	-0.14	-0.05
Минеральные воды	0.63	1.19	0.91	-0.01	-0.07	0.12	-0.12	0.03
Буденновск	0.69	0.80	0.64	0.01	-0.01	0.13	-0.11	0.04
Сочи	0.82	-1.23	1.78	-0.09	-0.16	0.03	-0.16	-0.07
Красная поляна	0.90	-1.95	1.99	-0.09	-0.17	0.03	-0.16	-0.07
Зеленчукская	0.40	1.37	1.74	-0.07	-0.16	0.06	-0.16	-0.04
Кисловодск	0.55	1.04	1.32	-0.02	-0.10	0.11	-0.12	0.02
Шаджатмаз	0.46	1.25	1.36	-0.02	-0.10	0.11	-0.12	0.02
Клухорский перевал	0.74	-1.68	2.19	-0.05	-0.14	0.07	-0.12	0.00
Владикавказ	0.72	-0.41	1.49	0.02	-0.01	0.10	-0.07	0.05
Грозный	0.74	0.47	0.71	0.02	0.06	0.06	-0.07	0.04
Гудермес	0.78	0.31	0.62	0.02	0.08	0.04	-0.08	0.03
Сулак	0.69	-0.93	1.40	0.00	0.05	0.04	-0.13	0.03
Дербент	0.63	0.50	0.78	0.00	0.16	-0.01	-0.13	0.00
Буйнакск	0.62	0.33	0.82	0.03	0.16	0.04	-0.10	0.03
Махачкала	0.69	0.57	0.68	0.05	0.23	0.05	-0.09	0.03

Коэффициенты линейных трендов повторяемости дней с осадками выше 15 мм/день (а, г, ж, к), 30 мм/день (б, д, з, л) и 50 мм/день (в, е, и, м) в [днях/сезон]/10 лет на метеостанциях в 1979-2018 гг. зимой (а-в), весной (г-е), летом (ж-и) и осенью (к-м). Статистически значимые на уровне 0.05 тренды показаны жирными контурами.



Данные реанализа ERA5 за период 1979-2020 гг. Средние летние значения CAPE (А, в Дж/кг) и влагосодержания (Б, в кг/м²); коэффициенты линейного тренда CAPE летом (В, в Дж/[кг за 10 лет]) и влагосодержания летом (Г, в кг/[м² за 10 лет]), Д – разность между данными, полученными по реанализу ERA5 и теоретически рассчитанными значениями величины тренда влагосодержания по уравнению Клаузиуса-Клапейрона летом (в кг/[м² за 10 лет]), Е – коэффициенты линейного тренда интегрального значения дивергенции влаги для лета (в кг/[м²с за 10 лет]). Штриховкой показаны области с статистически значимыми трендами.

