

*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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Москва — 2023



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### 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; Векругаев 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 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 [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, участвовавшими 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.

### **Благодарности**

Автор выражает глубокую признательность и искреннюю благодарность своему научному руководителю, академику РАН, доктору физико-математических наук Семенову Владимиру Анатольевичу, всем сотрудникам лаборатории климатологии Института географии РАН за внимание, проявленное к выполненной работе, и плодотворные научные дискуссии. Автор также признательна преподавательскому составу кафедры метеорологии и климатологии Географического факультета МГУ, в особенности к.г.н., доценту Торопову Павлу Алексеевичу за многолетнюю всестороннюю помощь и конструктивное обсуждение результатов работы. Автор выражает глубокую благодарность соавтору к.ф.-м.н. Чернокульскому Александру Владимировичу за плодотворное сотрудничество. Автор искренне благодарна всем родным и близким, в особенности супругу Алексею за всестороннюю поддержку.

### **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.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, ее практическая значимость и научная новизна, сформулированы цели и задачи исследования, указан личный вклад автора, приведены сведения об апробации работы, структуре и объеме диссертации.

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

**Глава 1** содержит основные сведения о современном состоянии исследований режима осадков, при этом отдельное внимание уделяется характеристикам экстремальных осадков на территории России.

**В разделе 1.1.** проводится обзор литературы по наблюдаемой пространственно-временной изменчивости характеристик температуры и осадков на глобальном масштабе и для территории России. **В разделе 1.2.** отражены основные процессы, влияющие на изменчивость режима осадков. Проведен обзор работ по изучению физических механизмов и факторов, влияющих на режим экстремальных осадков. Наибольшую актуальность в данном направлении исследований имеет вопрос о возможном влиянии процесса глобального потепления на изменение частоты или силы экстремальных погодных и климатических явлений, что также отражено в обзоре исследований

по данной тематике. В **разделе 1.3.** представлен обзор источников данных об атмосферных осадках, используемых в работе. Перечислены основные характеристики данных метеорологических станций архива ВНИИГМИ-МЦД, реанализов (ERA-Interim, ERA5), сеточных архивов температуры и осадков (CRU TS, E-OBS, GPCP), модели общей циркуляции атмосферы ECHAM5 и глобальных климатических моделей, входящих в проект CMIP6. Проведен обзор работ по оценке качества воспроизведения особенностей температурно-влажностного режима сеточными архивами при глобальных и региональных исследованиях. Отмечено, что при использовании сеточных архивов существуют ошибки, связанные с процедурой интерполяции, и невозможно получить их идеальной согласованности с данными метеорологических станций. Поэтому при анализе сеточных архивов часто рассматривают общую пространственную структуру и ее изменение, а точные количественные оценки проводят на основе метеорологических наблюдений.

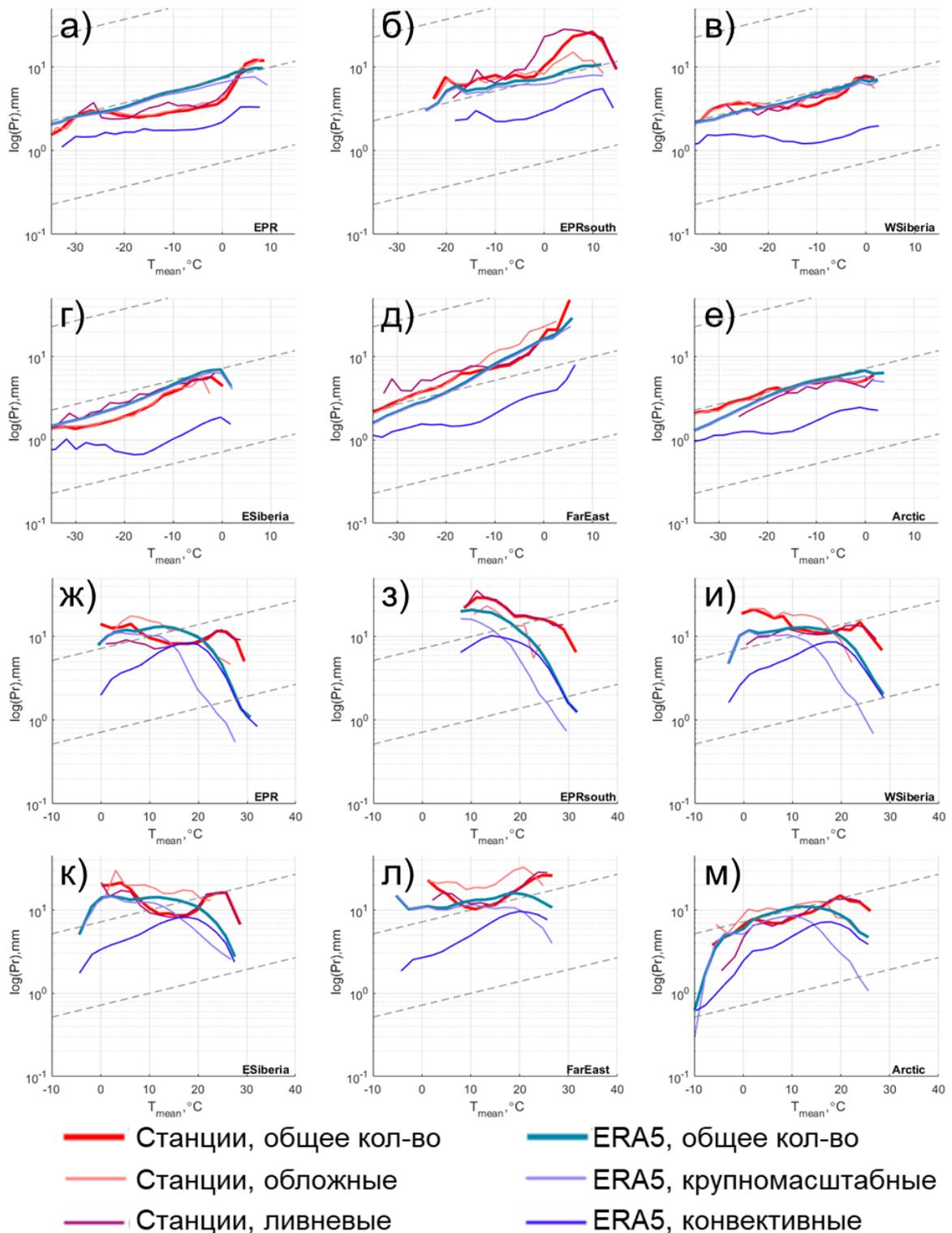
Таким образом, в **Главе 1** на основе анализа литературы показано, что изучение характеристик экстремальных осадков является важным вопросом современной науки. Понимание механизмов возникновения сильных осадков в настоящее время необходимо для составления более точных климатических и метеорологических прогнозов опасных метеорологических явлений, которые помогут уменьшить потенциальные риски от таких явлений.

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

В **главе 2** представлены результаты исследования особенностей связи экстремальных осадков с приземной температурой воздуха в последние десятилетия на территории России с использованием данных стационарных наблюдений и реанализа ERA5.

Методика вычисления приведена в **разделе 2.1** и заключается в установлении типа связи между средней температурой и характерной для нее величиной экстремальных суточных сумм осадков. В качестве показателя экстремальных осадков для каждого диапазона использовалось значение 95%-го перцентиля эмпирического распределения осадков за весь исследуемый период отдельно для каждого сезона и каждой станции.

Согласно соотношению Клаузиуса-Клапейрона, логарифм влагоемкости атмосферы и, как в целом ожидается, логарифм интенсивности осадков, в том числе экстремальных, увеличивается линейно при росте температуры. В **разделе 2.2** проведена проверка выполнения соотношения Клаузиуса - Клапейрона для разных сезонов года. На **рисунке 1** показаны зависимости экстремальных осадков (общей суммы, ливневых/конвективных и обложных/крупномасштабных осадков) от температуры для разных регионов России зимой и летом. Зимой соотношение Клаузиуса-Клапейрона выполняется преимущественно для станций и узлов реанализа в Азиатской части страны (п – ов Таймыр, северо-восточная Сибирь, южная Сибирь и Дальний Восток). При этом в Приморском крае и на побережье Камчатки отмечается увеличение осадков, превышающее выбранное соотношение как минимум в два раза.



**Рисунок 1.** 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.

Также при применении линейной аппроксимации связи логарифма экстремальных осадков со средней температурой было показано, что зимой на юге Дальнего Востока наблюдаются самые высокие на территории России темпы усиления осадков с ростом температуры. Летом, за исключением северных регионов России, отмечается уменьшение осадков при росте температуры, причем такая тенденция усиливается с севера на юг и достигает значений  $-12-14 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$  на юге Европейской территории России (ЕТР) (**рисунок 1 з**). Весной и осенью осадки увеличиваются на 6-9% только на юге Сибири, в остальных регионах наблюдаются меньшие значения. Данные реанализа при сравнении с данными метеостанций в целом верно отразили основные региональные особенности соотношения Клаузиуса-Клапейрона для разных сезонов.

Летом (**рисунок 1 ж-м**) усиление экстремальных осадков при росте температуры продолжается в среднем до  $15-20^{\circ}\text{C}$ , затем это увеличение практически останавливается, а в некоторых случаях экстремальные осадки начинают уменьшаться. На юге ЕТР летом отмечается 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  $18-20^{\circ}\text{C}$ , в реанализе – выше  $15^{\circ}\text{C}$  на ЕТР, в Сибири и Арктике, выше  $20^{\circ}\text{C}$  на Дальнем Востоке.

Одной из гипотез, объясняющей наблюдаемое уменьшение осадков летом при температурах выше  $15-20^{\circ}\text{C}$ , может являться влияние изменения относительной влажности как индикатора наличия влаги и статической устойчивости атмосферы. Для проверки этого утверждения в **разделе 2.3** были построены зависимости относительной влажности от температуры для случаев выпадения сильных осадков (выше 95%-го перцентиля). Зимой во всех регионах, кроме юга ЕТР, выпадение осадков происходит при условиях достаточно высоких значений относительной влажности (выше 70%), причем при повышении температуры экстремальные осадки сопровождаются более высокими значениями относительной влажности. На юге ЕТР зимой в условиях положительных температур наиболее сильные осадки наблюдаются преимущественно при относительной влажности 90-100%. Летом, не смотря на значительную изменчивость относительной влажности, общей особенностью здесь является снижение значений относительной влажности при температурах выше  $15-20^{\circ}\text{C}$ , которое сопровождается снижением экстремальных осадков. Стоит также отметить, что значение температуры, при котором происходит уменьшение относительной влажности достаточно хорошо совпадает со значениями вершины параболы при квадратичной аппроксимации экстремальных осадков.

Вполне вероятно, что наблюдаемое снижение относительной влажности может объяснять хотя бы часть случаев уменьшения экстремальных осадков при высоких температурах. Полученный результат подтверждает важность наличия дополнительных источников влаги при осадкообразовании, а не только повышения испарения и влагосодержания атмосферы при более высоких температурах.

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

В главе 3 представлены оценки изменений характеристик режима приземной температуры воздуха и осадков в XX-XXI вв. на территории России по данным метеорологических станций, сеточных архивов данных (реанализ ERA5, архив CRU TS 4.06) и ансамбля из 34-х моделей климата проекта CMIP6. Будущие изменения в моделях CMIP6 проанализированы на основе экспериментов со сценариями эмиссий ssp245 (со снижением эмиссий парниковых газов примерно с середины XXI в.) и ssp585 (с непрерывным ростом эмиссий до конца века). В качестве порогового значения экстремальных осадков использовался 95% процентиль функции распределения для периода 1981-2010 гг. Для экстремально низких и высоких температур были вычислены значения 5%-го и 95%-го перцентилей для периода 1981-2010 гг. Также были использованы суточные данные реанализа ERA5 за период 1979-2021 гг. и среднемесячные данные CRU TS4.05 за период 1901—2021 гг.

В разделе 3.1 проведен анализ изменений характеристик температуры на территории России в XX-XXI вв. По данным метеорологических станций и реанализа ERA5 на территории России последние 40 лет происходит практически повсеместное повышение температуры. Зимой наибольшие темпы повышения температуры отмечаются на станциях Арктического побережья, которые превышают  $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10$  лет. Зимой выделяется область с отрицательными трендами на юге Западной Сибири с минимумом в Алтайском регионе, однако полученные отрицательные тенденции преимущественно статистически не значимы. Летом температура увеличивается в Восточной Сибири и на Европейской территории России с максимальными значениями в южных регионах страны.

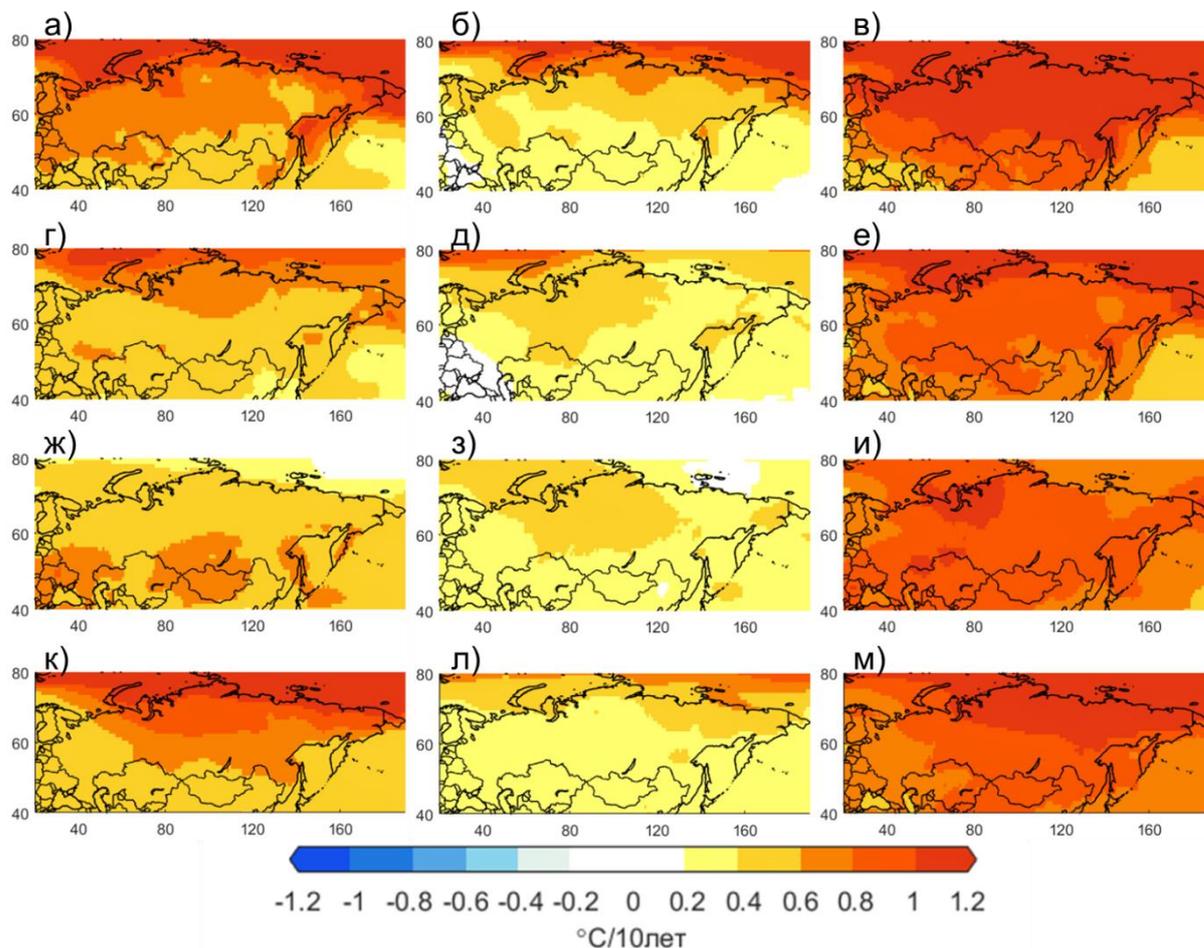
По данным климатических сценариев во второй половине XXI столетия рост температуры может продолжиться, но темпы повышения температуры по умеренному сценарию ssp245 над сушей ниже, чем в современный период ( $0.2 - 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10$  лет). Для более жесткого сценария ssp585 в 2051-2080 гг. повышение температуры весной и летом может составить  $0.8-1\text{ }^{\circ}\text{C}/10$  лет, а для зимнего сезона практически на всей территории России (кроме юга ЕТР) могут превысить  $1 - 1.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10$  лет (рисунок 2).

Повторяемость дней с экстремально высокими температурами в последние десятилетия увеличивалась быстрее всего летом на северо-восточном побережье Черного моря (4-6 дней/сезон/10 лет). 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. В XXI столетии согласно климатическим моделям повторяемость высоких температур продолжит увеличиваться.

В разделе 3.2 проведено исследование особенностей наблюдаемых и ожидаемых изменений характеристик осадков в России.

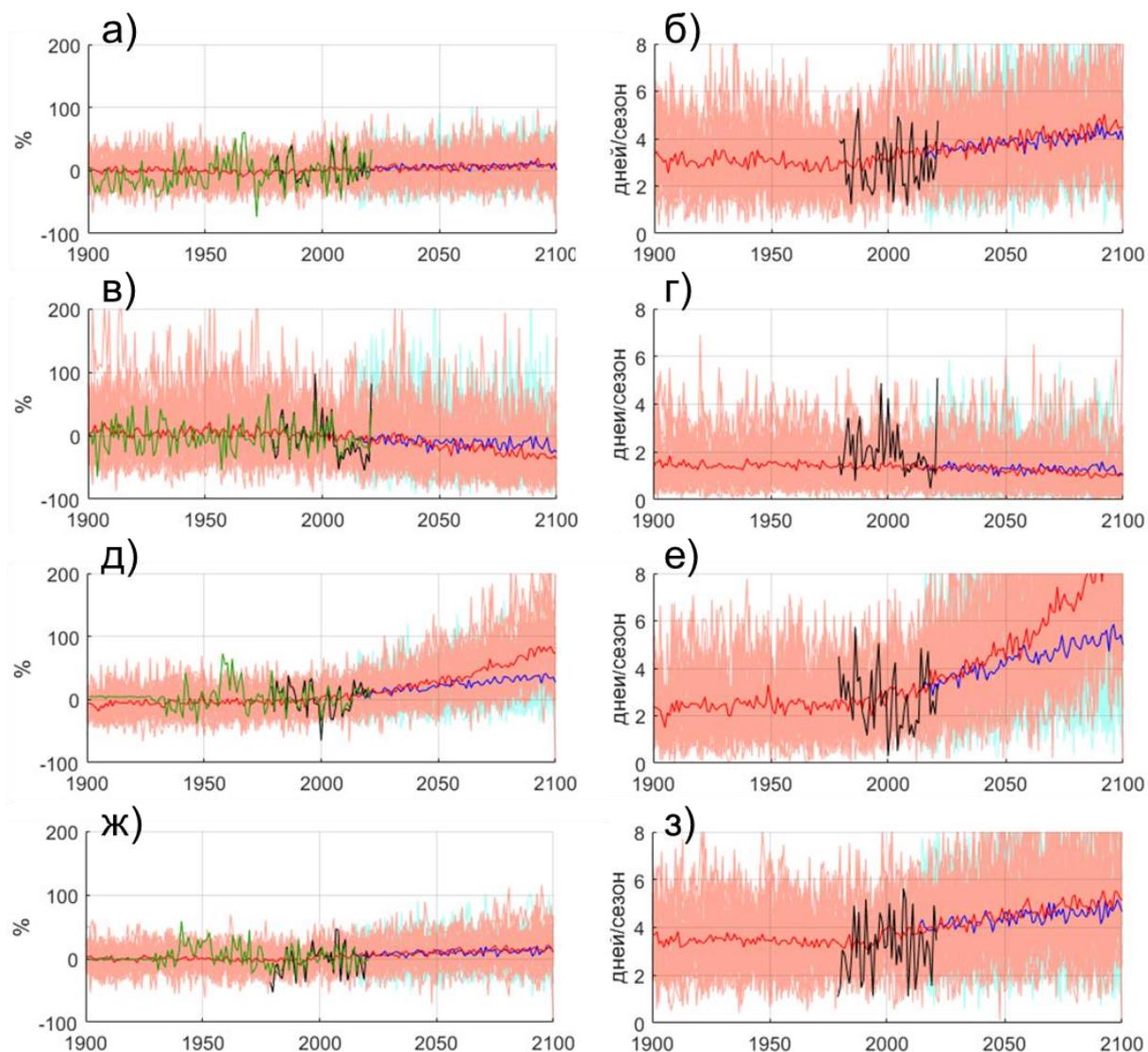
Для современного периода по эмпирическим данным зимой значимое увеличение сезонных сумм осадков на  $15 - 20\%/10$  лет отмечается на отдельных станциях на побережье Дальнего Востока и в Поволжье. При этом для центральной

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. Летом уменьшение сумм осадков отчетливо выражено в двух регионах страны: на юге Восточной Сибири и юге ЕТР (рисунок 3).



**Рисунок 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, 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).

Модели климата в среднем для ансамбля показывают рост относительных сумм осадков и повторяемости экстремальных осадков на большей части территории России в зимний период по жесткому сценарию 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.



**Рисунок 3.** Изменение сезонных сумм осадков (в % относительно 1981 - 2010 гг., а, в, д, ж) и повторяемости экстремальных осадков (в дн./сезон, б, г, е, з) на юге ЕТР (а-г) и п-ве Таймыр (д-з) зимой (а, б, д, е) и летом (в, г, ж, з) по данным наблюдений CRUTS4.05 (зеленая кривая), 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.

К концу XXI столетия изменения становятся более выраженными. Зимой в среднем по моделям отмечается увеличение относительных сумм осадков на севере Сибири на величину от 30-40% до 80-90% по сценариям SSP245 и SSP585, соответственно (**рисунок 3 д**, сценарий ssp585), которое сопровождается увеличением повторяемости дней с экстремальными осадками (**рисунок 3 е**). На юге ЕТР зимой не отмечается изменений сезонных сумм осадков, но при этом может увеличиться повторяемость дней с экстремальными осадками на 1 – 2 дня/сезон (**рисунок 3 а, б**). Летом на ЕТР к концу XXI столетия отмечается статистически не значимое уменьшение сумм осадков (на 10-30% по сравнению с современным климатом) и количества дней с осадками.

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

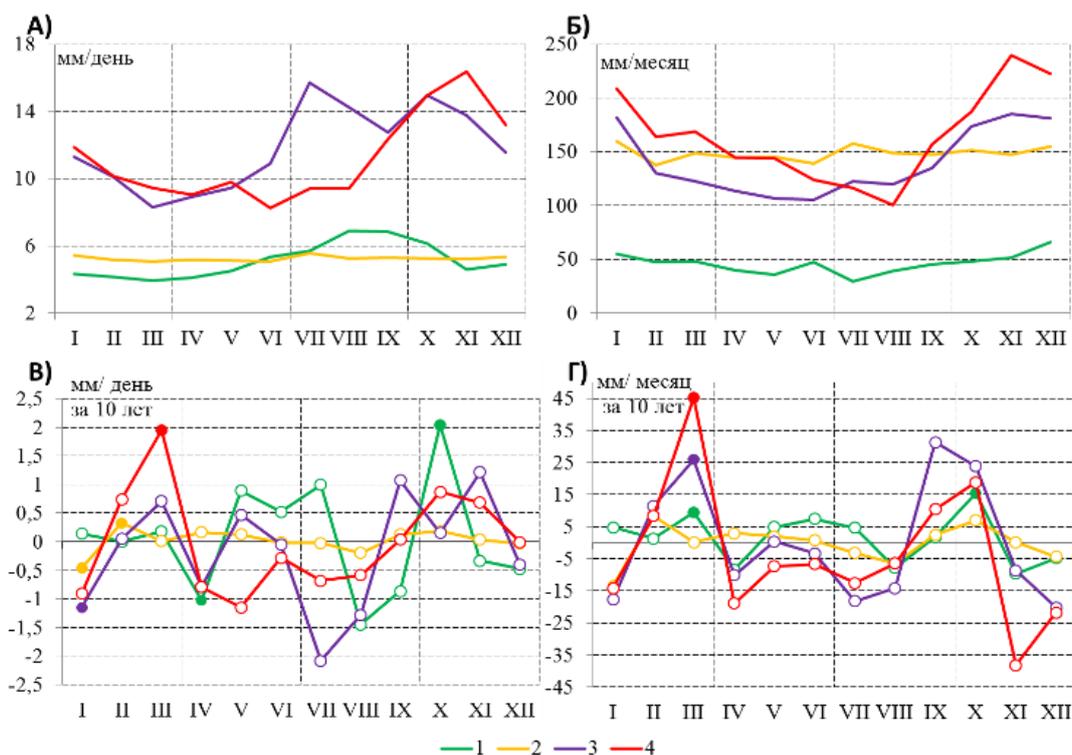
В разделе 4.1 проведено сравнение основных сеточных источников данных, используемых в работе, с метеорологическими наблюдениями на станциях для Черноморского побережья Кавказа. Для всех сеточных архивов установлена хорошая согласованность с метеорологическими станциями для вариаций данных по приземной температуре воздуха. Результаты аналогичных сравнений для осадков показали меньшую степень схожести с инструментальными данными. Отмечено, что количественные оценки особенностей изменения режима осадков предпочтительнее проводить с использованием данных наблюдений на метеорологических станциях, а сеточные архивы рассматривать как источник дополнительной информации для регионов, в которых отсутствуют более качественные данные.

В разделе 4.2 исследованы характеристики температуры и режима осадков на территории Черноморского побережья Кавказа по данным метеорологических станций и сеточных архивов данных.

В качестве меры климатических изменений за выбранный период времени используется коэффициент линейного тренда, полученный по методу наименьших квадратов. Проверка значимости линейных трендов проводилась с использованием соответствующих статистических критериев с уровнями значимости 0.05.

Начиная со второй половины 20 века, в регионе наблюдается значимое повышение приземной температуры воздуха, ярче выраженное в летний период, полученное как на основе стационарных данных, так и по данным реанализа ERA-Interim. По стационарным данным средняя скорость потепления на равнинах и в предгорьях Кавказа в 1979-2018 гг. летом составила  $0.7 \pm 0.2$  °C/10 лет, в горных районах порядка  $0.5 \pm 0.1$  °C/10 лет. По данным реанализа над акваторией Черного моря величина тренда составила примерно  $0.6$  °C/10 лет. Анализ трендов сезонных сумм осадков, а также интенсивности осадков не показал однонаправленных статистически значимых изменений. Для зимних месяцев характерно слабое, статистически не значимое уменьшение осадков над побережье Черного моря ( $-3 \dots 6\%$ /10 лет) и небольшое увеличение в Прикаспийской низменности и на Восточном Кавказе ( $12 - 15\%$ /10 лет). Летом происходит слабое уменьшение осадков практически на всей исследуемой области ( $-3-9\%$ /10 лет), за исключением юго-востока Черного моря и прилегающего к нему побережья Грузии.

Сезонные оценки могут давать противоречивые результаты при условии разнонаправленных тенденций в разные месяцы, поэтому также проведен анализ средних значений и трендов интенсивности осадков и сумм осадков по месяцам (рисунок 4), который также не показал статистически значимых согласованных изменений характеристик осадков на станциях Черноморского побережья Кавказа. Значимые тренды на станциях наблюдаются лишь в отдельные месяцы. Поэтому в целом нельзя сделать вывод о значимых изменениях сумм и интенсивности осадков в регионе. 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.



**Рисунок 4.** Годовой ход среднемесячной интенсивности осадков (а), месячных сумм осадков (б), коэффициентов трендов для среднемесячной интенсивности осадков (в) и месячных сумм осадков (г) на метеорологических станциях (зеленая кривая – Анапа, желтая кривая – Туапсе, фиолетовая кривая – Сочи, красная кривая – Красная поляна), период 1979-2018 гг. (статистически значимые тренды показаны закрашенными точками).

Помимо средних значений осадков и их интенсивности, был проведен анализ трендов характеристик экстремальных осадков (повторяемости дней с экстремальными осадками, вклада экстремальных осадков в общую сумму, максимальных за сезон суточных осадков, повторяемости дней с осадками выше 15 мм, 30 мм и 50 мм). В качестве порогового значения экстремальных осадков использовался 95% процентиль функции распределения для периода 1981-2010 гг.

Анализ изменений характеристик экстремальных осадков на станциях Северного Кавказа в целом не показал каких-либо однозначных тенденций. Значимые тренды получены лишь для отдельных станций в разные сезоны года. Большинство полученных трендов являются статистически не значимыми – можно говорить лишь о слабой тенденции того или иного знака. 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.

Таким образом, в результате анализа временной изменчивости характеристик режима осадков ЧПК не обнаружено каких-либо однозначных зависимостей. 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. Летом получено преимущественно статистически не значимое уменьшение осадков (как средних характеристик, так и экстремальных значений) практически на всей исследуемой области.

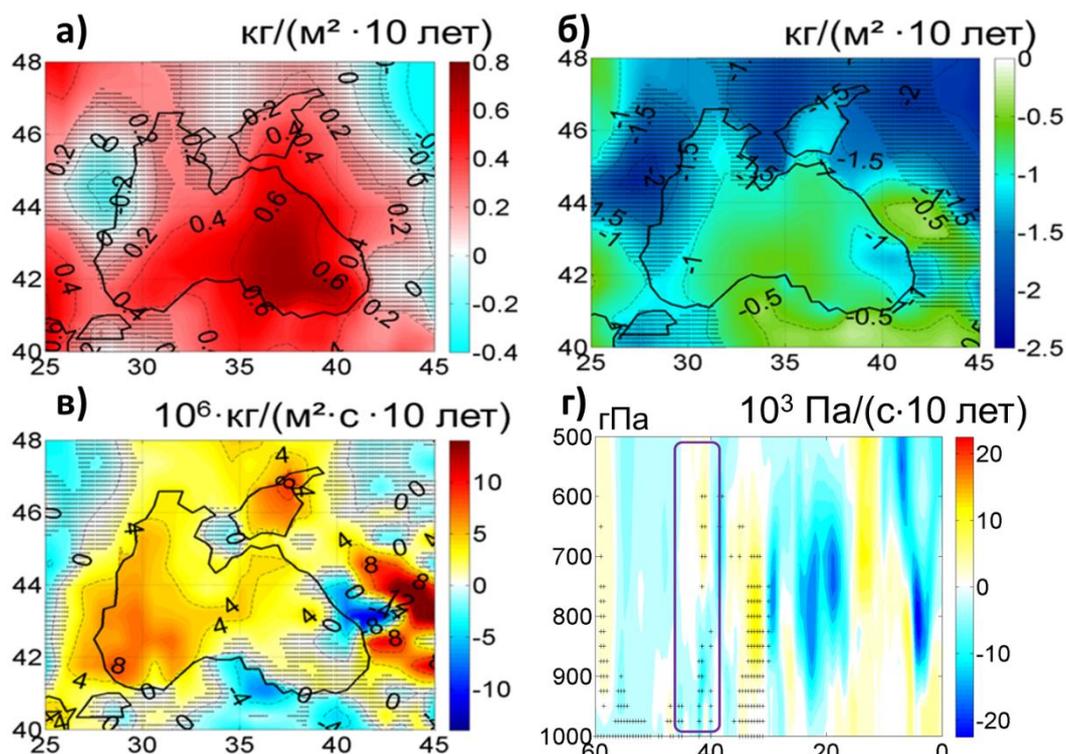
В разделе 4.3 предложена физическая интерпретация происходящих на Кавказе изменений климата на основе данных реанализа ERA-Interim по показателям цикла влаги в атмосфере (влагосодержание воздуха, величина CAPE, дивергенции влаги и др.). Предложены возможные механизмы и связи, которые могли послужить причинами наблюдаемых изменений климата в регионе.

Показано, что летом за последние четыре десятилетия произошло трехкратное увеличение средних значений конвективной доступной потенциальной энергии (CAPE) в юго-восточной части Черного моря, где также отмечаются самые высокие для региона показатели роста температуры поверхности океана (ТПО) ( $0.6 - 0.8^{\circ}\text{C}/10$  лет) и влагосодержания атмосферы ( $0.6-1 \text{ кг}/\text{м}^2/10$  лет, рисунок 5 а). Согласно уравнению Клаузиуса-Клапейрона, рост температуры всей толщи тропосферы на  $1^{\circ}\text{C}$  приводит к увеличению ее влагосодержания примерно на 7% [Min et al., 2011]. Сравнивая полученный результат с фактическими данными (рисунок 5 б) 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 1979-2015 гг. оказалось на 5-15% меньше, чем рассчитанное по уравнению Клаузиуса-Клапейрона.

Причиной замедления роста влагосодержания может быть увеличение дивергенции потоков влаги в регионе, а также уменьшение интенсивности восходящих движений в атмосфере (рисунок 5 в, г). Такие процессы могут приводить к тому, что на фоне интенсивного роста температуры не происходит заметного изменения режима осадков.

В разделе 4.4 представлена оценка вклада увеличения температуры поверхности Черного и Средиземного морей, а также глобальных изменений температуры поверхности океана (ТПО) в изменения характеристик экстремальных осадков на Черноморском побережье Кавказа в летний период за последние 40 лет на основе анализа данных численных расчетов с моделью общей циркуляции атмосферы (МОЦА).

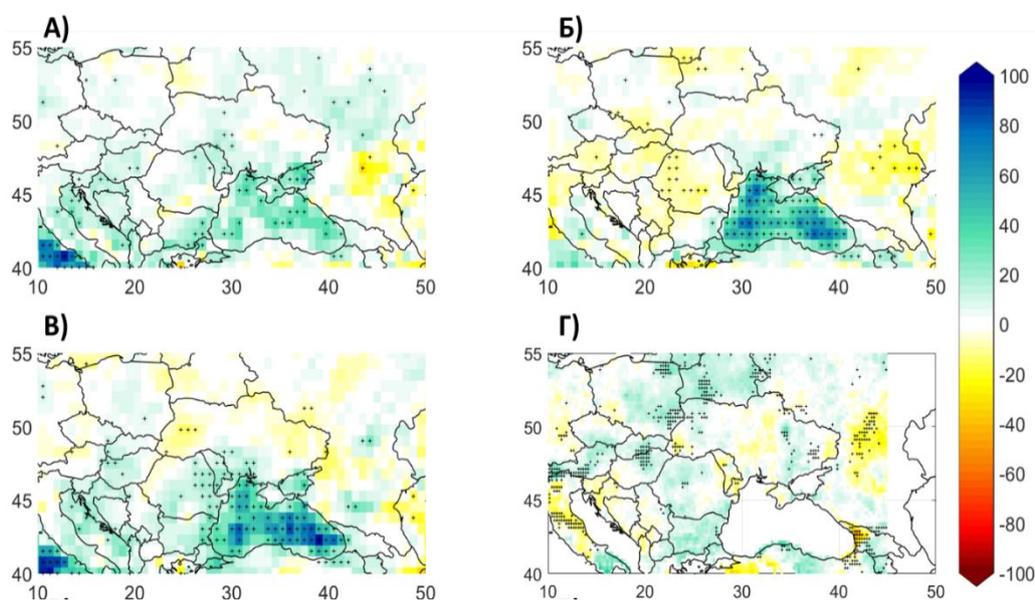
В предыдущем разделе было показано, что на фоне сильного увеличения температуры на ЧПК не происходит согласованного увеличения как средних, так и экстремальных показателей осадков, не наблюдается в регионе и отдельного усиления ливневых или обложных осадков [Chernokulsky et al., 2019]. Данные особенности могут быть обусловлены совместным действием механизмов подавления конвекции, а также общим изменением характеристик общей циркуляции атмосферы в средних широтах.



**Рисунок 5.** Данные реанализа ERA-Interim за период 1979-2018 гг. Коэффициенты линейного тренда влагосодержания летом (а,  $\text{кг}/[\text{м}^2 \text{ за } 10 \text{ лет}]$ ), разность между данными, полученными по реанализу ERA-Interim и теоретически рассчитанными значениями величины тренда влагосодержания по уравнению Клаузиуса-Клапейрона летом (б,  $\text{кг}/[\text{м}^2 \text{ за } 10 \text{ лет}]$ ), коэффициенты линейного тренда интегрального значения дивергенции влаги для лета (в,  $\text{кг}/[\text{м}^2 \text{ с за } 10 \text{ лет}]$ ), коэффициенты линейных трендов (г,  $\text{Па}/\text{с за } 10 \text{ лет}$ ) для аналога вертикальной скорости по среднему меридиональному разрезу для области  $35\text{-}40^\circ \text{ в.д.}$  летом (прямоугольником выделена исследуемая область).

Для оценки вклада региональных и глобальных изменений температуры поверхности океана и внутренних морей в наблюдаемые тенденции изменения характеристик осадков в черноморском регионе были использованы данные расчетов с моделью общей циркуляции атмосферы ECHAM5 (спектральное разрешение T159, примерно  $0.7^\circ \times 0.7^\circ$ ). В модели использовались граничные условия (глобальные поля ТПО и концентрация морских льдов) для периодов 1970 -1999 гг. («холодный океан») и 2000-2012 гг. («теплый океан»), а также глобальное поле ТПО с изменениями значений ТПО для периода 2000-2012 гг. только в Черном и Средиземном морях. Длительность каждого эксперимента составляла 40 лет. Конфигурация экспериментов позволяет отделить эффекты повышения ТПО в этих морях от изменений, связанных с глобальным потеплением. Проведенный ранее анализ этих экспериментов позволил выявить связь увеличения температуры Средиземного моря с участвующими 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.

По результатам анализа численных экспериментов выявлено, что рост ТПО не приводит к статистически значимому увеличению среднего количества осадков и их экстремальных значений на Черноморском побережье Кавказа. При глобальном повышении ТПО на 0.8 градусов происходит небольшое (на 10-25% от нормы при холодном океане) увеличение средней интенсивности осадков над акваторией Черного моря (**рисунок 6**). В то же время, при региональных изменениях это повышение выражено сильнее (на 25-50% от нормы). Однако, на побережье Черного моря статистически значимого увеличения интенсивности осадков не отмечается ни в одном из экспериментов, в некоторых регионах напротив, происходит уменьшение осадков (Астраханская и Волгоградская области). Интенсивность экстремальных осадков при региональном повышении ТПО увеличивается над морской поверхностью более чем в полтора раза над северо - западной частью акватории и уменьшается на побережье.



**Рисунок 6.** Средние (по ансамблю) разности между экспериментами для интенсивности осадков на Черноморском побережье (в %): А – (Теплый океан – Холодный океан), Б – (Теплое Черное море – Холодный океан), В – (Теплое Черное и Средиземное моря – Холодный океан), Г – разность по данным E-OBS для периодов (2000-2012 гг.) – (1970-1999 гг.). Значимые разности (на уровне 0.05) показаны точками.

Анализ результатов расчета характеристик конвективной неустойчивости в атмосфере (CAPE и CIN) показал, что региональное повышение ТПО Черного и Средиземного морей приводит к образованию более благоприятных условий для развития конвективных процессов и, как следствие, выпадения осадков над морями и прибрежными регионами. 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 влаги 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.

### **В Заключение** сформулированы основные **выводы работы**:

**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  $0.8^\circ$  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 ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в журналах из Перечня рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК или индексируемых в системах Russian Science Citation Index (RSCI), Scopus, Web of Science:*

1. *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.
2. *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. doi: 10.21513/2410-8758-2019-3-59-75.
3. *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.

4. 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. doi: 10.31857/S0321059622040174.
5. *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.
6. *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.

***Рецензируемые тезисы докладов, индексируемые в Web of Science:***

7. *Aleshina M. A., Semenov V. A.* Observed extreme precipitation-temperature scaling in Russia during 1961-2017 // 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. — Vol. 11560 of Proc of the SPIE. — 2020. — P. 115606M. doi: 10.1117/12.2575510.
8. *Aleshina M. A., Cherenkova E. A., Semenov V. A., Bokuchava D. D., Matveeva T. A., Turkov D. V.* Observed and expected changes in extreme precipitation frequency in Russia in the 20th-21st centuries //25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – International Society for Optics and Photonics, 2019. – Т. 11208. – С. 1120886. doi: 10.1117/12.2540921.
9. *Cherenkova E. A., Semenov V. A., Babina E. D., Aleshina M. A., Bokuchava D. D.* Modern and projected changes of extreme summer precipitation in the Far East of Russia //24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – International Society for Optics and Photonics, 2018. – Т. 10833. – С. 108337A. doi: 10.1117/12.2503789.



Подписано в печать:  
Объем: 1.0 п. л.  
Тираж: 100 экз. Заказ №  
Отпечатано в \_\_\_\_\_