

На правах рукописи

ОЛЬГА ГЕННАДИЕВНА ЗОЛИНА

**СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ
ОСАДКОВ И РЕГИОНАЛЬНЫЙ АТМОСФЕРНЫЙ ЦИКЛ ВЛАГИ**

25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Официальные оппоненты:

Гордов Евгений Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук

Королев Виктор Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова»

Рожков Валентин Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры океанологии, Институт Наук о Земле, Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Войкова»

Защита состоится « » 2018 г. в ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д327.003.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» по адресу: Большой Предтеченский переулок, д.11-13, г. Москва, 122342.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» и на сайте центра: https://meteoinfo.ru/images/misc/sovet/zolina/new/disser_zolina_final_2_new.pdf.

Автореферат разослан «___» 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета к. ф.-м. н.



М.В. Шатунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Экстремальные или особо сильные и редко выпадающие осадки имеют принципиальное значение для возникновения экстремальных гидрологических явлений, в первую очередь наводнений, приносящих большие экономические убытки. В последние два десятилетия исследованию экстремальных осадков было посвящено огромное количество работ в области численного моделирования и экспериментальной диагностики [например, *Groisman et al., 2005; Kharin et al., 2007; Kiktev et al., 2007; Leander et al., 2014*]. Это, однако, не обеспечило появления устойчивых оценок характеристик экстремальных осадков, как для их среднеклиматических распределений, так и для параметров их климатической изменчивости. Как результат, существующие оценки экстремальных осадков характеризуются сильными неопределенностями, что также справедливо и для прогностических климатических оценок, основанных на сценарных расчетах с помощью климатических моделей [*Kharin et al., 2007; Collins et al., 2013*]. Причины неопределенностей состоят в недостаточной обоснованности и противоречивости методов статистического оценивания экстремальных осадков, а также в несопоставимости оценок экстремальных осадков по разным данным. Без достоверных оценок экстремальных осадков невозможно получить взаимосогласованные характеристики гидрологического цикла для различных регионов. Это, в частности, касается районов, где возникают трудности, связанные с неопределенностями физических методов оценивания адвекции влаги в атмосфере и их численной реализации. Это обосновывает актуальность данного исследования, направленного на развитие существующих и разработку новых методов статистического моделирования и оценивания экстремальных осадков, проведение всеобъемлющего анализа характеристик экстремальных осадков на основе различных типов данных, а

также на развитие методов расчетов адвекции влаги в атмосфере и анализа роли осадков в формировании регионального гидрологического цикла.

Цель работы – построение достоверных количественных оценок экстремальных осадков на основе развития новых методов их статистического моделирования и установление роли экстремальных осадков в гидрологическом цикле.

Для достижения этой цели в работе решались **следующие задачи**:

- Разработка физически обоснованных методов статистического моделирования абсолютной и относительной экстремальности атмосферных осадков;
- Обоснование и разработка нового подхода к статистическому моделированию совместных характеристик продолжительности и интенсивности осадков;
- Статистическое моделирование климатических характеристик абсолютной и относительной экстремальности с использованием различных типов данных (станционные наблюдения, реанализы, спутниковые данные);
- Использование развитых методов статистического моделирования экстремальных осадков для получения устойчивых оценок климатической изменчивости их характеристик по различным типам данных;
- Обоснование нового метода расчетов потоков влаги в атмосфере на основе реанализов и данных аэрологических зондирований и разработка соответствующих численных алгоритмов;
- Получение достоверных оценок переносов влаги, анализ их физических механизмов и установление связи осадкообразования с адвекцией влаги для различных регионов.

Предметом защиты является решение фундаментальной научной проблемы – достоверное количественное описание пространственно-временной структуры характеристик экстремальных осадков и их климатической изменчивости на основе статистического моделирования и исследование роли экстремальных осадков в формировании регионального гидрологического цикла.

Основные положения, выносимые на защиту, содержат результаты, полученные автором впервые, что определяет **научную новизну** результатов диссертации:

- Предложены новые вероятностные распределения и разработаны алгоритмы оценки их параметров для статистического моделирования абсолютной и относительной экстремальности осадков, что позволило предложить новый индекс относительной экстремальности, существенно более устойчивый, чем ранее использованные.
- Выполнены оценки абсолютной и относительной экстремальности осадков за последние несколько десятилетий по различным типам данным и получены количественные характеристики сезонной изменчивости абсолютной и относительной экстремальности осадков. Проведено сравнение характеристик экстремальных осадков для различных типов данных, которое показало, что реанализы существенно занижают оценки экстремальных осадков (в среднем на 30-35%), спутниковые данные зимой завышают на 30-50%, а летом сильно занижают (на 40-60%) оценки экстремальных осадков.
- На основе разработанной методологии оценивания линейных трендов получены оценки межгодовой изменчивости абсолютной и относительной экстремальности осадков по данным станционных наблюдений, реанализов и спутниковых измерений. Показано, что с 1960 по 2012 гг. на большей части территории Европы и России наблюдается

увеличение как абсолютной (до 8% в десятилетие), так и относительной (до 5% в десятилетие) экстремальности осадков. В центральной Европе обнаружена сильная сезонность трендов на масштабах нескольких десятилетий с увеличением экстремальных осадков зимой и уменьшением их значений летом. Показано, что оценки межгодовой изменчивости по данным реанализов и спутников очень сильно отличаются от оценок по данным наблюдений на станциях, вплоть до различия знаков в трендах для ряда районов.

- Выполнен анализ статистической структуры осадков над Мировым океаном, включающий рассмотрение числа дней с осадками и интенсивность осадков, по спутниковым данным и реанализам. Установлено, что различия в числе дней с осадками и интенсивности осадков существенно больше, чем в среднем количестве осадков. Показано, что межгодовая изменчивость средних осадков в реанализах сильно зависит от однородности объема и типов ассилируемых данных.
- Создан новый подход к статистическому моделированию продолжительности влажных и сухих периодов (включая их совместные распределения) и интенсивности осадков, связанных с периодами разной продолжительности. Этот метод основан на использовании усеченного геометрического распределения и полученного в работе распределения частичного вклада влажных и сухих периодов в общее количество влажных дней.
- Построены достоверные оценки продолжительности влажных и сухих периодов и исследована их межгодовая динамика. Показано что, увеличение продолжительности влажных периодов за последние 60 лет на евроазиатском континенте (на 4-8% в десятилетие) связано с увеличением интенсивности экстремальных осадков (на 6-8% в

десятилетие), а также что продолжительность влажных и сухих периодов может как одновременно как возрастать, так и уменьшаться. Предложена концептуальная модель совместной изменчивости влажных и сухих периодов.

- Разработан новый алгоритм расчета адвекции влаги в атмосфере, основанный на численной схеме, учитывающей поверхностную топографию, и позволяющий уверено разделять переносы влаги на компоненты, связанные со средним потоком, синоптическими вихрями, крупномасштабными горизонтальными и вертикальными ячейками циркуляции.
- Оценены различные компоненты переноса влаги на основании 7 реанализов и данных аэрологических зондирований IGRA для Арктики и Антарктики. На примере Арктики показано, что транспорт влаги на разных высотах, в основном, осуществляется синоптическими и мезомасштабными вихрями (88-95% общего переноса). Несмотря на уменьшение переноса влаги в Арктику в период 1979-2013 гг., относительная роль вихревого переноса влаги возросла на 15% за последние 36 лет, при этом влагозапас Арктической атмосферы увеличивался на 1.7% в десятилетие (в среднем по всем реанализам). Установлено, что механизм увеличения влагозапаса имел локальную природу, связанную с неадиабатическим испарением, а адвективные процессы играли вторичную роль.
- Выполнен анализ атмосферного гидрологического цикла и исследована роль потоков в пограничном слое и в свободной тропосфере в динамике влагопереноса на примере Красного моря. Показано, что перенос влаги с акватории Красного моря осуществляется в нижней тропосфере (до уровня 850гПа) циркуляцией бризового типа, а в слое выше 850гПа управляет динамикой Аравийского антициклона и его взаимодействием

с внутритропической зоной конвергенции. Показано, что с начала 1990-х гг. до 2010 г. происходило резкое увеличение (примерно на 40%) экспорта влаги с акватории моря, что связано с усилением циркуляции бризового типа в приземном слое, в значительной степени модулируемой сигналом в поверхностной температуре воды.

Достоверность полученных результатов определяется использованием современных представлений о статистиках экстремальных значений и хорошо теоретически обоснованных подходов к статистическому моделированию экстремальных осадков и расчетам атмосферной адвекции влаги. В работе использованы данные станционных наблюдений и атмосферных реанализов, а также спутниковые массивы данных, что позволило обеспечить взаимную валидацию и интеркалибрацию всех полученных оценок. Достоверность полученных результатов, связанных с климатической изменчивостью, определяется использованием обоснованных методов статистического оценивания, позволяющих получать взаимодополняющие оценки значимости климатических сигналов.

Научная и практическая значимость работы состоит в использовании разработанных алгоритмов для оценивания характеристик экстремальных осадков для любых существующих видов данных, включая анализ результатов моделирования общей циркуляции атмосферы и климата. Диссертационная работа является итогом исследований, выполнявшихся автором с 2002 г., в рамках научных программ Министерства образования и науки РФ, Федеральных целевых программ, инициативных проектов РФФИ, а также ряда международных проектов.

Полученный в работе новый индекс относительной экстремальности осадков используется Группой экспертов по обнаружению и индексам изменения климата (Expert Team on Climate Change Detection and Indices ETCIDI) Всемирной программы исследований климата, вместо ранее

использовавшегося, и предложен в качестве стандартной диагностики для следующего оценочного доклада МГЭИК. Созданные автором долговременные массивы статистических характеристик экстремальных осадков используются для валидации региональных моделей, в частности COSMO в Метеослужбе Германии и ALADIN в метеослужбе Франции, а также для анализа характеристик осадков в Национальном центре Климатических Данных NCDC/NOAA США. Оценки характеристик экстремальных осадков по спутниковым данным, а также разработанные алгоритмы для их расчета используются Европейской организацией спутниковой метеорологии (EUMETSAT), а также Германским центром авиации и космонавтики (DLR). Развитые в работе методы диагноза адвективных переносов влаги используются в качестве базовой диагностики в ряде крупных исследовательских проектов, финансируемых Европейским Союзом, ANR и CNRS, а сами оценки используются для анализа качества реанализов и моделей в NOAA.

Личный вклад автора

В диссертационной работе представлены результаты лишь тех исследований, вклад автора в которые был ключевым на всех этапах от постановки задачи до ее решения. Автором самостоятельно разработаны новые алгоритмы для статистического моделирования экстремальных осадков, а также адвективных переносов влаги, осуществлена их численная и программная реализации. Также был подготовлен массив данных станционных наблюдений, включая контроль их качества, и выполнены массовые расчеты статистических параметров экстремальных осадков и характеристик их изменчивости. Кроме того был выполнен анализ пространственно-временной динамики экстремальных осадков и механизмов ее формирования, включая анализ изменчивости адвективных переносов влаги. Автору принадлежит ведущая роль в подготовке полученных результатов к опубликованию в

ведущих международных и российских журналах, а также представлении их на российских и международных конференциях и семинарах.

В результатах, полученных совместно с коллегами К. Зиммером, А. Капалой, К.П. Беляевым, С.К. Гулевым, П.Я. Гройсманом, А. Дуфуром, М. Локхофф, А. Зоммер и др., автору принадлежит ведущая роль в постановке задач, выполнении расчетов и интерпретации результатов.

Апробация диссертационной работы. Основные блоки работы докладывались на заседании Ученого совета физического направления ИО РАН (декабрь 2012 г., апрель 2017 г.), на семинаре Института водных проблем РАН (июль 2013 г.), на семинаре Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН (декабрь 2015 г.), на семинаре Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (декабрь 2015 г.), на семинаре Главной геофизической обсерватории им. А.И. Войкова (декабрь 2016 г.). Отдельные результаты работы были включены в курсы лекций «Изменения климата», «Физические и химические климатические модели», «Термодинамика» и «Динамическая метеорология», читаемые автором в Альпийском университете Гренобля (Франция). Автор докладывала основные результаты работы в качестве приглашенного докладчика на следующих международных конференциях и форумах:

- WCRP CLIVAR Open Science Conference, Чиндао, Китай, 2016,
- "Our Common Future Under Climate Change", Париж, Франция, 2015,
- "Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère" Тулуза, Франция, 2015,
- "Science of the Future", Санкт-Петербург, Россия, 2014,
- EGU General Assemblies, Вена, Австрия, 2014, 2011,
- "Cryosphere in a Changing Climate", Тромсё, Норвегия, 2014,
- "Developing a Water Strategy for the WCRP", Форт Коллинс, США, 2013,
- "WCRP-UNESCO Workshop on metrics and methodologies of estimation of extreme climate events", Париж, Франция, 2010,
- "7th Annaberger Klimatagen", Аннаберг, Германия, 2010,
- 9th EMS Annual Meeting, Тулуза, Франция, 2009,

- ESF Conference "Global challenges and the need for cooperation", Стокгольм, Швеция, 2009,
- 25th meeting of the Joint Scientific Committee, WCRP, Москва, Россия, 2004.

Кроме того, результаты были представлены на десятках конференций и симпозиумов в качестве устных и стеновых докладов.

Публикации. Материалы диссертации полностью изложены в работах, опубликованных соискателем. По теме диссертации опубликовано 24 статьи в рецензируемых научных журналах и коллективных монографиях. Одна статья в международном рецензируемом издании из списка, рекомендованного ВАК, находится в печати.

Благодарности. Автор выражает признательность коллегам, с которыми она тесно взаимодействовала в течение последних лет и с которыми обсуждала отдельные блоки работы, в частности К. Зиммеру, А. Капале, С. Бахнер (Меторологический институт университета Бонна, Германия), А. Дуфуру и А. Зоммер (Лаборатория гляциологии и геофизики, Гренобль, Франция), С. Сорошиану (Университет Калифорния-Ирвин, США), К. Тренберту (Национальный центр атмосферных Исследований, США), П. Гройсману (Национальный центр климатических данных США), К. Куммерову (Университет Колорадо, Форт Коллинс, США), Р. Лауфорду и Р. Стюарту (Университет Манитобы, Канада), Й. Шульцу (Европейская организация спутниковой метеорологии), М. Локхофф, Х. Мачелу и П. Беккеру (Метеослужба Германии), В.М. Катцову (ГГО им. Войкова), О.Н. Булыгиной (ВНИИГМИ-МЦД, Обнинск), А.Н. Гельфанду (ИВП РАН), Р.В. Бекряеву (СПбГУ). Автор также признательна коллективу ЛВОАМКИ ИО РАН за плодотворное сотрудничество и обсуждение результатов работы, особенно С.К. Гулеву, К.П. Беляеву и Н.Д. Тилининой за поддержку и внимание к работе.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 231 наименования, в том числе

218 на иностранных языках. Работа содержит 333 страницы текста, включая 22 таблицы и 209 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дано описание современных представлений о процессах, формирующих атмосферные осадки, параметрах их характеризующих и существующих проблемах их оценивания и статистического моделирования. Приведен критический обзор результатов исследований атмосферных осадков по различным типам данных. Здесь же дается общая характеристика работы, включающая обоснование актуальности темы, основную цель исследования, поставленные задачи, основные положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов, научную и практическую значимость, научную новизну результатов, личный вклад автора и аprobацию результатов исследования.

В **первой главе «Характеристики основных методов наблюдений и массивов данных об атмосферных осадках и анализ их неопределенностей»** критически анализируются **основные типы данных**, используемых для анализа атмосферных осадков в контексте их пространственно-временного разрешения и их возможностей для адекватного описания закономерностей климатической изменчивости осадков. Особое внимание уделено возможности анализа экстремальных осадков по разным типам данных. Рис. 1 показывает в координатах пространственно-временных масштабов характерное разрешение фронтальных и конвективных осадков и характеристики всех данных, доступных для анализа осадков с учетом их доступной продолжительности. Для достоверного анализа необходимо, чтобы разрешение данных соответствовало пространственно-временному разрешению характерных физических процессов. Если не учитывать длительность рядов, то данные наземных радаров, спутниковые измерения, а также плювиометры вполне адекватны для описания структуры осадков. Однако, при изучении климатических изменений, использование большей части данных ограничивается длиной рядов, что предполагает использование лишь

реанализов, данных осадкомерных станций с суточным разрешением и ограниченное использование спутниковых массивов, основанных, в том числе, на комбинировании спутниковых измерений с данными измерений на станциях.

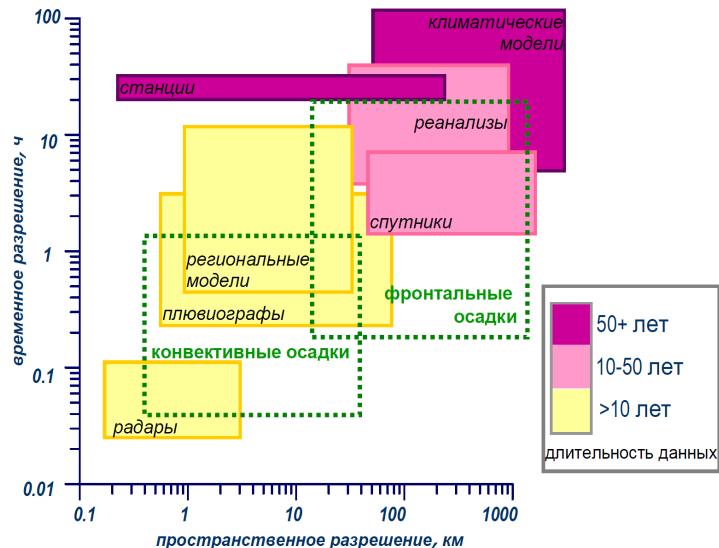


Рисунок 1. Типичное пространственно-временное разрешение доступных данных для анализа осадков в координатах масштабов пространство (км)-время (ч). Длительность рядов показана разными цветами. Зеленые квадраты показывают типичные пространственно-временные масштабы фронтальных и конвективных осадков

В первой главе подробно описываются четыре типа данных, использованных в работе: прямые измерения осадков на станциях с суточным разрешением, данные глобальных реанализов, спутниковые массивы данных и данные высотного зондирования атмосферы. В качестве базовых использовалось три разных массива данных станционных наблюдений, являющихся наиболее точными из всех доступных данных об осадках. Архив Королевского метеорологического института Нидерландов (KNMI), известная как European Climate Assessment data set, [ECA&D, Klok and Klein Tank, 2009] состоит из открытого для общего использования массива станций с суточным разрешением, включающего (по версии 2014 г.) 4727 синоптических станций, которые имеют временную длительность от двух десятилетий до более чем 100 лет. В работе были выполнены коррекции и дополнения данного массива, в частности, станциями Росгидромета.

Второй массив станционных измерений – это обновленный архив суточных измерений осадков на осадкомерных станциях Немецкого Метеорологического агентства (DWD) (рис. 2б). Эта одна из наиболее плотных и правильно организованных осадкомерных сетей в мире [Zolina *et al.*, 2008], регулярно обновляемая за счет оцифровки исторических данных и состоящая из 11617 станций, из которых 7561 переведены в цифровой формат и включены в базу данных (MIRAKEL-Datenbank). Все станции сети до 1990 г. были оборудованы осадкомерами типа HELLMAN. Начиная с 1990-х гг. эти приборы были повсеместно заменены автоматическими осадкомерами PLUVIO. Значительная часть станций была подвергнута контролю качества, включая коррекцию осадков на ветер, смачиваемость и внутреннее испарение осадкомеров.

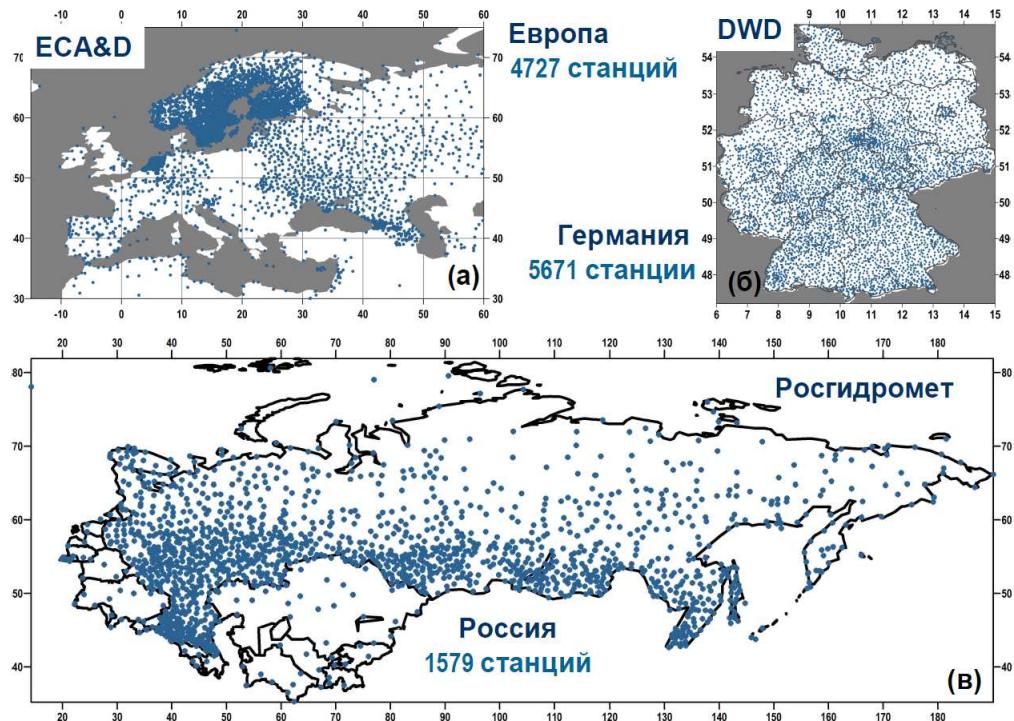


Рисунок 2. Распределение по территории Европейского континента станций наблюдений за осадками в разных архивах: (а) ECA&D, (б) Метеослужбы Германии (DWD) и (в) Росгидромета

Третий массив данных измерений – это российские станции Росгидромета с суточным разрешением (рис. 2в), сформированный из наблюдений, поступающих в Единый государственный фонд данных о

состоянии окружающей среды. Массив включает 1579 станций на территории России за период с 1881 г. по настоящее время. В рядах наблюдений имеется большое количество пропусков. В соответствии с рекомендациями *Zolina et al., 2005* было отобрано 1430 станций, удовлетворяющих критериям максимально допустимого количества пропусков в рядах осадков для их дальнейшего статистического анализа и оценки трендовых изменений. Для анализа данных Росгидромета был выбран период с 1966 по 2012 гг., поскольку до 1966 г. в наблюдениях за осадками, многократно была нарушена однородность рядов. В этом массиве не устранились погрешности измерений, связанные с влиянием ветра, которое может сказываться на точности измерения твердых осадков в районах с сильными ветрами [Гройсман и др., 2014].

Спутниковые данные об осадках доступны с конца 1970-х гг. и обеспечивают однородные в пространстве наблюдения с практически глобальным покрытием. Эти данные содержат значительные погрешности, связанные с неточностью алгоритмов расчета осадков по интенсивности прямого или рассеянного излучения, что связано с наличием в облачной атмосфере большого количества гидрометеоров, не формирующих осадки, а также пыли и аэрозолей, идентифицируемых микроволновыми датчиками как потенциальные осадки. В работе используется три разных массива данных, основанных на измерениях со спутников: GPCP1DD (Global Precipitation Climatology Project) [Huffman et al., 2001], PERSIANN-CDR [Ashouri et al., 2015] и TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) [Bauer, 2001; Chambon et al., 2013]. Массив данных GPCP1DD, версия 1.2, с суточным разрешением покрывает период с 1998 г. по настоящее время с пространственным разрешением 1° и представляет собой комбинацию спутниковых осадков, измеренных в разных диапазонах, и осадков, измеренных на станциях. Массив данных PERSIANN-CDR также имеет суточное разрешение на сетке 0.25° за период с 1984 г. по настоящее время, покрывая район от 60°с.ш. до 60°ю.ш. Массив данных TRMM является результатом измерений осадкометрного радара,

базирующегося на спутниках, сканирующих область от 50°с.ш. до 50°ю.ш. с использованием различных активных микроволновых датчиков с очень высоким пространственным разрешением.

Модели общей циркуляции атмосферы, ассимилирующие данные наблюдений, являются ещё одним важным источником информации об осадках. В работе использовалось 9 разных реанализов для характеристик осадков и адвективных переносов влаги в атмосфере. Основные характеристики использованных в работе реанализов приводятся в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики реанализов, использовавшихся в работе

Реанализ	Схема усвоения данных	Горизонтальное /вертикальное разрешение модели	Горизонтальное/вертикальное разрешение данных	Год создания модели Ссылка
ERA15 (ECMWF)	OI	T106/L31	2.5°/L4	1996, <i>Gibson et al. (1999)</i>
ERA40 (ECMWF)	3D-Var	T159/L60	2.5°/L23	2003, <i>Uppala et al., 2000; Kallberg, 2002</i>
NCEP-R1	3D-Var	T62/L28	2.5°/L8	1995, <i>Kalnay et al. (1996)</i>
NCEP-R2-DOE	3D-Var	T62/L28	2.5°/L10	2001, <i>Kanamitsu et al. (2002)</i>
JRA 25	3D-Var	T106/L40	1.25°/L10	2004, <i>Onogi et al. (2007)</i>
ERA-Interim (ECMWF)	4D-Var	T255/L60	0.75°/L23	2006, <i>Dee et al. (2011)</i>
NCEP-CFSR	3D-Var+FOTO	T382/L64	0.5°/L23	2009, <i>Saha et al. (2010)</i>
MERRA	3D-Var + IAU	1/2°×2/3°/L72	½°×2/3°/L23	2009, <i>Rienecker et al. (2011)</i>
JRA 55	4D-Var	T319/L60	0.5°/L23	2009, <i>Ebita et al. (2011)</i> <i>Kobayashi et al. (2015)</i>

Для валидации характеристик переносов влаги, полученных по данным реанализов, в работе были использованы данные высотного зондирования атмосферы из Объединенного Архива Радиозондирования [IGRA, Integrated Global Radiosonde Archive, *Durre et al., 2006*]. Для района севернее 60°с.ш., использовано 63 станции, прошедшие контроль качества. В Антарктиде было проанализировано 10 доступных станций. Измерения покрывают период с 1979 г. по настоящее время и представлены на стандартных уровнях: 1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250 и 200 гПа.

Основные результаты Главы 1 опубликованы в работах *Zolina et al. (2005), Zolina et al. (2008), Золина и Булыгина (2016), Groisman et al. (2017)*.

Во второй главе «Развитие новых методов статистического моделирования атмосферных осадков» развиты существующие и разработаны новые методы статистического моделирования осадков и предложены новые подходы к количественному оцениванию экстремальных осадков. Были рассмотрены три основные группы параметров, характеризующих абсолютную экстремальность осадков, относительную экстремальность и экстремальность с учетом временной структуры осадков. В упрощенном классическом подходе анализ в рамках этой концепции строится на использовании базовой триады параметров [см. например, *Groisman et al., 1999*], включающих число дней с осадками, не равное числу дней в рассматриваемой реализации. Поэтому среднее значение осадков за определенный период (p_{mean}), связанная с ним сумма выпавших осадков P_{tot} и интенсивность осадков (p_{int}) не равны друг другу:

$$p_{mean} = \frac{P_{tot}}{n_{tot}}, \quad p_{int} = \frac{P_{tot}}{n_{wet}}, \quad (1)$$

где n_{tot} – общее число дней в реализации, n_{wet} – количество дней с осадками. Использование базовой триады (средних осадков, числа дней с осадками и интенсивности осадков) является неплохим первым приближением для анализа основных характеристик экстремальных осадков. Однако для получения устойчивых оценок необходимо статистическое моделирование осадков, основанное на использовании распределений начальных значений или распределений экстремальных величин.

В работе для анализа абсолютной экстремальности (т.е. абсолютных величин наиболее сильных осадков, выпавших за определенный период

времени) в качестве распределения начальных значений использовалось гамма-распределение с функцией плотности вероятности (ФПВ):

$$F(x) = \frac{\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta \Gamma(\alpha)}, \quad \alpha > 0, \quad \beta > 0, \quad (2)$$

где $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция, α – безразмерный параметр формы, определяющий асимметричность ФПВ гамма-распределения, а β – размерный (мм/день, в данном случае) параметр масштаба, определяющий растяжение-сжатие ФПВ.

Средняя интенсивность осадков в этом случае равна $\bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} F(x) \cdot x dx = \alpha\beta$. Для гамма-распределения был обоснован оптимальный метод оценивания параметров на основе максимального правдоподобия [Greenwood and Durand, 1960]. Было показано, что этот метод является более точным и эффективным, чем традиционный метод моментов [Wilks, 1990, 1995] и даже более точным, чем параметрические методы [Thom, 1958].

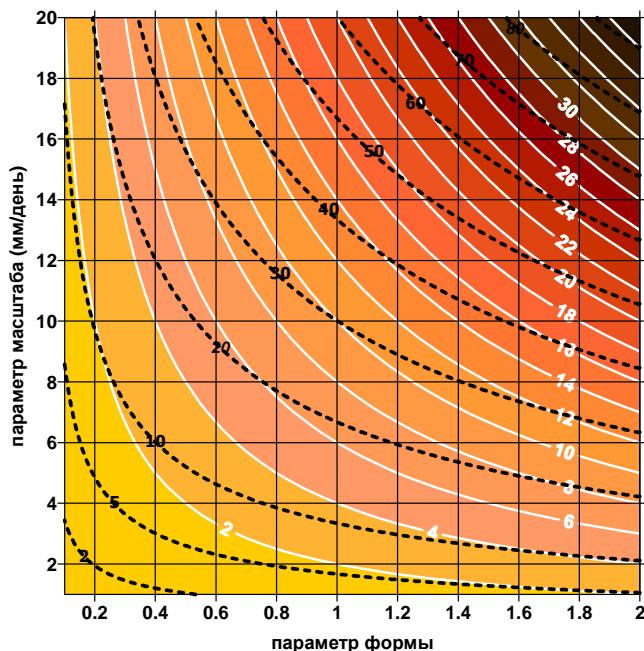


Рисунок 3. Двухпараметрическая диаграмма, характеризующая свойства гамма-распределения в координатах параметров формы и масштаба. Белые линии показывают величины средней интенсивности осадков, пунктирные линии соответствуют 95%-ной точке кумулятивной функции гамма-распределения

Для анализа свойств гамма-распределения в смысле исследования роли различных параметров в формировании величин экстремальных осадков была предложена 2-мерная диаграмма (рис. 3), позволяющая анализировать средние и экстремальные величины осадков в зависимости от параметров распределения [Zolina *et al.*, 2004]. В зависимости от изменений параметров одни и те же значения средних интенсивностей приводят к возникновению отличающихся друг от друга экстремальных значений.

В качестве альтернативного распределения для анализа экстремальных значений также рассматривались распределения Парето и трехпараметрическое обобщенное экстремальное распределение (ОЭР), ФПВ которого задается в виде:

$$f(x; \mu, \sigma, \xi) = \frac{1}{\sigma} \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{(-1/\xi)-1} \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\}, \quad (3)$$

а функция распределения равна

$$F(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\}, \quad (4)$$

где $\mu \in R$ – параметр локализации, $\sigma > 0$ – параметр масштаба, $\xi \in R$ – параметр формы. В работе проанализированы неопределенности использования распределения Парето и ОЭР, связанные с выбором пороговых значений для получения экстремальной выборки. Было показано, что при анализе осадков в большинстве случаев, например, для ОЭР, не выполняются основные требования теоремы типов экстремальности, требующей независимости и одинаковой распределенности измерений, то есть постулирующей, что если X_1, X_2, \dots, X_T независимы и одинаково распределены, то распределение $M_T = \max\{X_1, X_2, \dots, X_T\}$ может быть аппроксимировано ОЭР. Выполненный анализ позволил обосновать эффективность использования гамма-распределения для

оценивания экстремальных осадков. Кроме того, был детально рассмотрен вопрос о статистическом тестировании точности аппроксимации суточных осадков гамма-распределением в рамках параметрических и непараметрических тестов Колмогорова-Смирнова (k - s тест) и хи-квадрат.

Еще одной важной характеристикой экстремальных осадков является их относительная экстремальность, т.е. вклад наиболее влажных дней в общее количество осадков за промежуток времени (месяц, сезон). Традиционно оценки относительной экстремальности выполняются с использованием индекса $R95pTOT$ [Klein Tank and Koenen, 2003] или аналогичных индексов для других квантилей. Эти индексы используются в отчетах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [Trenberth et al., 2007; Hartmann et al., 2013] для анализа изменчивости экстремальных осадков и оцениваются как:

$$R95pTOT = \frac{\sum_{n=1}^N R_n | R_n > R95}{\sum_{n=1}^N R_n}, \quad (5)$$

где R_n – суточное количество осадков в конкретный день n ($R \geq 1$ мм) рассматриваемого сезона (месяца), N – число дней с осадками в течение этого сезона (месяца), $R95$ – 95-й процентиль осадков, полученный для всего анализируемого периода (полной выборки всех дней с осадками в рассматриваемые сезоны или месяцы в интервале между начальным и конечным годом анализируемого периода), $R_n | R_n > R95$ – условная вероятность, равная R_n при $R_n > R95$ и 0 в противном случае.

В работе показано, что индексы семейства (5) обладают неопределенностью, поскольку в 30-40% случаев обращаются в ноль, особенно при малом числе дней с осадками [Zolina et al., 2009]. Это приводит к неверным оценкам как средних характеристик осадков, так и их изменчивости в

большинстве работ. Для достоверного определения относительной экстремальности в работе было предложено непрерывное распределение, позволяющее рассчитывать вклад различных долей суммарного количества дней с осадками в сезонные или месячные суммы осадков [Zolina *et al.*, 2009; Zolina *et al.*, 2013]. Из ФПВ гамма-распределения (2) было получено распределение отношения осадков, выпавших в течение заданного количества дней k к сумме осадков, выпавших за некоторый период времени для $1 \leq k \leq n$, где n – количество дней с осадками (размер выборки):

$$y(k) = \sum_{j=1}^k x_j \Big/ \sum_{i=1}^n x_i, \quad (6)$$

где x_i , $i=1, \dots, n$ – суточные значения осадков за период n , x_j , $j=1, \dots, k$ – суточные значения осадков для выбранных k дней. Независимая переменная y в (6) изменяется от 0 до 1 и зависит от α и от количества дней с осадками n , при этом она не зависит от β . Для этой величины было обосновано новое непрерывное распределение (распределение частичного вклада, РЧВ). Была получена функция распределения случайной величины $y=y_k$:

$$C_k(y) = \frac{\Gamma(n\alpha)}{k\alpha\Gamma[(n-k)\alpha]\Gamma(k\alpha)} \cdot y^{k\alpha} (1-y)^{(n-k)\alpha} F_2^1(1, n\alpha, k\alpha+1, y), \quad (7)$$

где $F_2^1(a, b, c, y)$ – гауссова гипергеометрическая функция, для которой было получено соотношение:

$$F_2^1(a, b, c, x) = 1 + \frac{ab}{c \cdot 1} x + \frac{a(a+1)b(b+1)}{c(c+1) \cdot 1 \cdot 2} x^2 + \dots + \frac{a(a+1) \dots (a+l-1)b(b+1) \dots (b+l-1)}{c(c+1) \dots (c+l-1) \cdot 1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot (l-1)} x^l + \dots \quad (8)$$

при $a=1$, $b=n\alpha$, $c=k\alpha+1$.

Для ФПВ этого распределения было получено выражение, удовлетворяющее условиям $\lim_{x \rightarrow 0} F(x) = 0$; $\lim_{x \rightarrow 1} F(x) = 1$:

$$F_k(y) = \frac{\Gamma(n\alpha)}{\Gamma[(n-k)\alpha]\Gamma(k\alpha)} y^{k\alpha-1} (1-y)^{(n-k)\alpha-1}, \quad (9)$$

Поскольку предлагаемое распределение является точным математическим следствием гамма-распределения для случайных значений, его точность аппроксимации и устойчивость определяется точностью аппроксимации исходного распределения. Использование именно гамма-распределения не является критичным, РЧВ в виде соотношений подобных (7-9) могут быть выведены и для других теоретических распределений (например, Вейбула). На основании РЧВ был получен новый устойчивый индекс относительной экстремальности:

$$R95tt = 1 - C_{95}(n), \quad (10)$$

где n – количество дней осадками, C_{95} – оценка функции распределения С РЧВ (7) для соответствующего процента (в данном случае 95%), полученного для всего периода измерений, по гамма-распределению. Предложенный формализм (7-10) побудил авторов индекса $R95pTOT$ пересмотреть его формулировку и предложить новую характеристику относительной экстремальности, также основанную на теоретических распределениях [Leander *et al.*, 2014].

Для анализа свойств нового распределения была предложена 2-мерная диаграмма, позволяющая в практических приложениях оценивать относительную экстремальность (рис. 4). Эта диаграмма показывает различные доли от суммы выпавших осадков за 5% дней с наиболее сильными осадками и различные проценты суммы осадков, обеспечиваемые 5%-ми дней с осадками в

координатах параметра формы гамма-распределения (α) и количества дней с осадками. При изменениях величин экстремальных осадков за счет параметра формы вклад определенной доли дней с осадками в их сумму существенно зависит от количества дней с осадками. Таким образом, РЧВ распределение позволяет явно учесть количество дней с осадками и в то же время оперировать непрерывно распределенными вкладами суточных осадков в сумму.

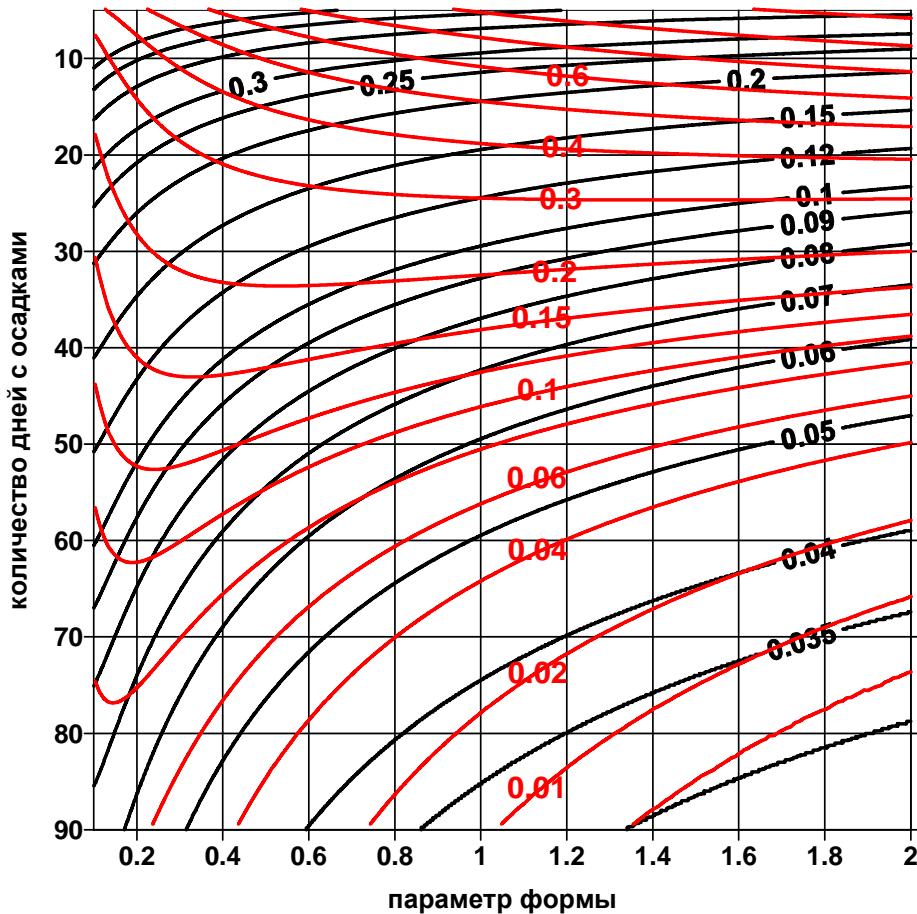


Рисунок 4. Двухпараметрическая диаграмма в координатах параметра формы гамма-распределения и количества дней с осадками, характеризующая свойства РЧВ распределения. Чёрные линии показывают различные доли суммы выпавших осадков за 5% дней с осадками, красные линии представляют различные проценты суммы осадков, обеспечиваемые 5% дней с осадками

Различия оценок относительной экстремальности для одной станции, полученных с помощью традиционного индекса $R95pTOT$ (5) и нового индекса $R95tt$ (9) показаны на рис. 5. Хорошо видно, что новый индекс не обращается в 0 и оценки трендов, выполненных с использованием нового индекса, будут

существенно отличаться от оценок, сделанных для традиционного индекса относительной экстремальности.

Кроме расчета абсолютной и относительной экстремальности для описания характеристик экстремальных осадков необходимо также учитывать длительность периодов с осадками. Эмпирический анализ длительности периодов с осадками и длительности сухих периодов показывает, что при оценивании экстремально длинных периодов возникает проблема их слабой статистической обеспеченности, что требует обоснования теоретического распределения для аппроксимации длительности периодов с осадками. В работе *Zolina et al., 2013* было модифицировано широко используемое для различных задач геометрическое распределение. При этом разработанный подход позволяет использовать другие дискретные распределения, например, Log-Series или смешанное геометрическое распределение.

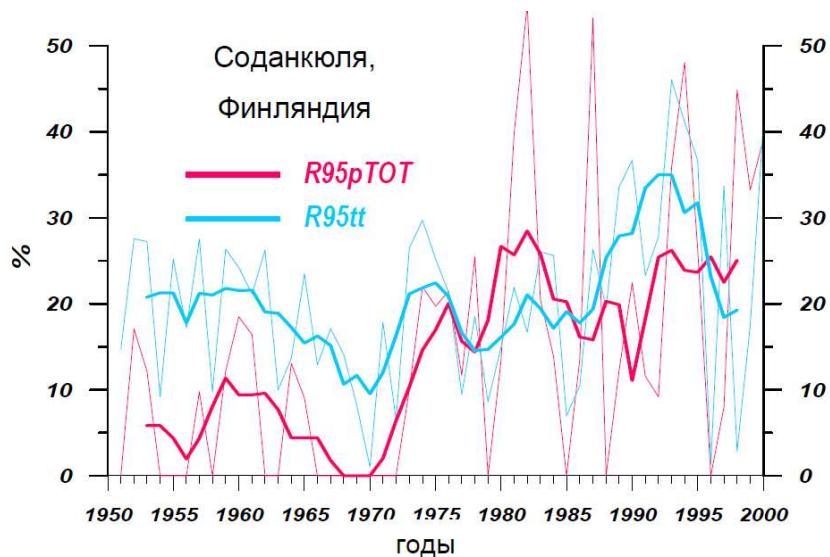


Рисунок 5. Временная изменчивость индексов $R95pTOT$ (красным) и $R95tt$ (голубым) для станции Соданкуля (Финляндия) зимой за период с 1950 по 2000 гг. Жирными линиями показано 5-летние осреднение

Поскольку продолжительность самого длинного влажного/сухого периода не может превышать общее количество влажных/сухих дней за рассматриваемый период, геометрическое распределение было модифицировано для случая усеченного геометрического распределения (УГР). В отличие от стандартного геометрического распределения

$$P(x_i = k) = p(1-p)^{k-1}, \quad (11)$$

где x_i (целое по определению) – продолжительность периода с дождями или сухого периода, $p=1/d_s$, d_s – средняя продолжительность, являющаяся параметром распределения, УГР учитывает явно только реальное количество влажных и сухих дней в ряду. В этом случае ФПВ для УГР задается как:

$$P_t(x_i = k) = Cp_t(1-p_t)^{k-1}, \quad (12)$$

где p_t параметр распределения, а множитель C учитывает общее количество влажных или сухих дней N :

$$C = \left(\sum_{k=1}^N p_t(1-p_t)^{k-1} \right)^{-1} = \left(p_t \frac{1-(1-p_t)^N}{1-(1-p_t)} \right)^{-1} = \frac{1}{1-(1-p_t)^N}, \quad (13)$$

что дает окончательное выражение для плотности вероятности УГР:

$$P_t(x_i = k) = \frac{1}{1-(1-p_t)^N} \cdot p_t(1-p_t)^{k-1}, \quad (14)$$

где p_t – параметр распределения, целое k – длина влажных/сухих периодов в днях, $k=1, 2, \dots, N$, и N – количество влажных/сухих дней, то есть максимальная теоретически возможная длина влажного/сухого периода. УГР определено на интервале $[1, N]$, тогда как стандартное геометрическое распределение определено на интервале $[1, \infty]$. Для такого распределения было получено уравнение для оценки параметров с помощью метода максимального правдоподобия:

$$\frac{1}{p} - \frac{N(1-p_t)^{N-1}}{1-(1-p_t)^N} + \frac{1}{1-p_t} = \bar{X}, \quad (15)$$

где \bar{X} – среднее по выборке ($\bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i / N$) и предложен эффективный итерационный алгоритм для решения (15):

$$\frac{1}{p_t^{l+1}} - \frac{N(1-p_t^l)^{N-1}}{1-(1-p_t^l)^N} + \frac{1}{1-p_t^{l+1}} = \bar{X}, \quad (16)$$

где p_t^l определяет сходимость для l -й итерации, по отношению к известной начальной итерации p^0 при заданной точности. Для того чтобы получить теоретическое распределение вклада сухих и влажных периодов в общее количество сухих и влажных дней, было предложено распределение частного вклада периодов разной длины в общее число дней с осадками (или в общее число сухих дней). Для этого оценивался частный вклад одного периода $X_i = k$, в сумму n случайных величин (дней) распределенных в соответствии с УГР (13) как:

$$\begin{aligned} F(y) &= P\left[\left(X_i / \sum_{i=1}^n X_i\right) = y\right] = \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} pq^{k-1} P\left(\sum_{i=1}^n X_i = \frac{k}{y}\right) = \sum_{k=1}^{\infty} pq^{k-1} P\left(\sum_{i=1}^{n-1} X_i = \frac{k}{y} - k\right), \end{aligned} \quad (17)$$

где X_1, \dots, X_n независимые и одинаково распределенные целые случайные переменные (длительности периодов) подчиняющиеся распределению (14), k – длительность единичного сухого/влажного периода, n – известное целое. Затем была получена ФПВ вклада суммы всех переменных, распределенных в соответствии с УГР (то есть сухих и влажных периодов с продолжительностью k) в общее число влажных или сухих дней в ряду:

$$P_F(k) = C_F \frac{k}{n} p_t (1-p_t)^{k-1}, \quad (18)$$

и функция распределения C_F в виде:

$$C_F = \frac{C \cdot p_t \cdot n}{1 - (1-p_t)^{n+1} - (n+1)(1-p_t)^{n+1} \cdot p_t}. \quad (19)$$

Это распределение было названо усеченным геометрическим распределением частичного вклада (ЧУГР). Уравнения (16) и (17) позволяют анализировать частичный вклад периодов разной продолжительности в общее число сухих и влажных дней.

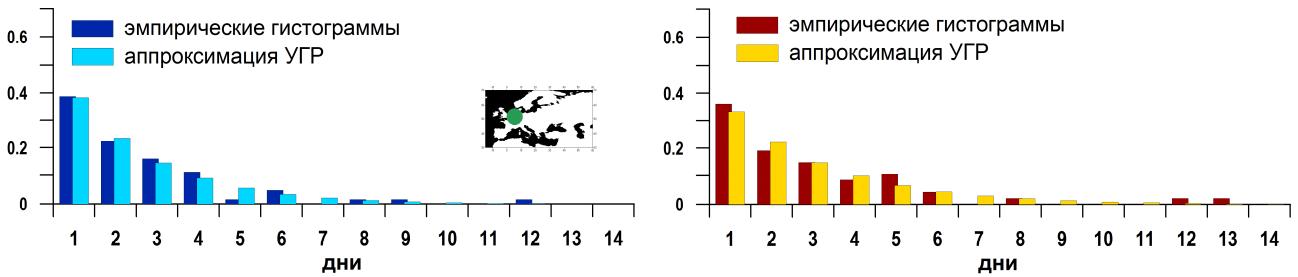


Рисунок 6. Пример эмпирических гистограмм (темно-синий и коричневый цвета) распределения длительности периодов с осадками (слева) и без осадков (справа) для станции, расположенной в Нидерландах. Аппроксимация УГР (голубым и желтым цветами) длительности периодов с осадками (слева) и без осадков (справа) для той же станции. Местоположение станции показано на врезной карте. Расчеты производились по годовым данным

Примеры эмпирических гистограмм для продолжительности периодов с осадками и без осадков и их аппроксимации УГР для станции в Нидерландах показаны на рис. 6. В большинстве случаев точность аппроксимации превышает 95%. Анализ эмпирических гистограмм и их аппроксимаций УГР для разных районов показывают, что практически везде, за исключением Западной Скандинавии, распределение сухих периодов имеет более «тяжелые хвосты», чем распределение влажных периодов, отражая более высокую вероятность возникновения длительных засух, чем затяжных дождей. На рис. 7 показаны примеры эмпирических распределений вклада периодов разной длины в общее количество влажных и сухих дней. Также показана

аппроксимация этого вклада УГРЧ. Эмпирические распределения, как для сухих, так и для влажных периодов, имеют «тяжелые хвосты», что в большинстве случаев недооценивается УГРЧ.

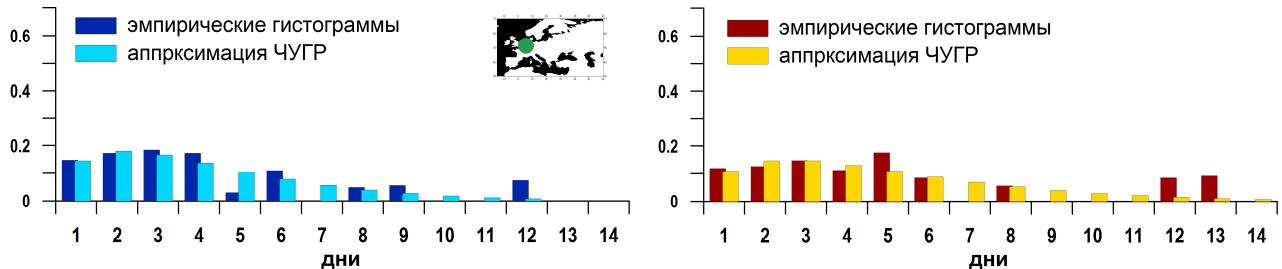


Рисунок 7. Пример эмпирических гистограмм (темно-синий и коричневый цвета) распределения частичного вклада периодов разной продолжительности в общее число влажных (слева) и сухих (справа) дней для станции, расположенной в Нидерландах. Аппроксимация ЧУГР (голубым и желтым цветами) частичного вклада периодов разной длительности в общее количество влажных (слева) и сухих (справа) дней для той же станции. Местоположение станции показано на врезной карте. Расчеты производились по годовым данным

Основные результаты, изложенные в Главе 2, опубликованы в работах *Zolina et al. (2009), Zolina et al. (2010), Золина (2011) и Zolina et al. (2013)*.

В третьей главе «Основные закономерности климатического распределения характеристик средних и экстремальных осадков по данным измерений на станциях» демонстрируются приложения развитой методологии статистического моделирования экстремальности осадков для задач получения достоверных климатических характеристик экстремальных величин осадков для различных районов по различным данным. Построены долговременные климатические ряды различных статистик осадков для территории Евразии по различным типам данных. В частности были получены климатические распределения абсолютных экстремальных значений осадков, определенных как осадки высших процентиляй распределений (95%, 99%, 99.9%) по данным ECA&D за период с 1950 по 2009 гг. и по данным Росгидромета за период с 1966 по 2012 гг. Пространственное распределение (рис. 8) показывает четко выраженную широтную и меридиональную зональность экстремальных осадков, а также их сезонные различия.

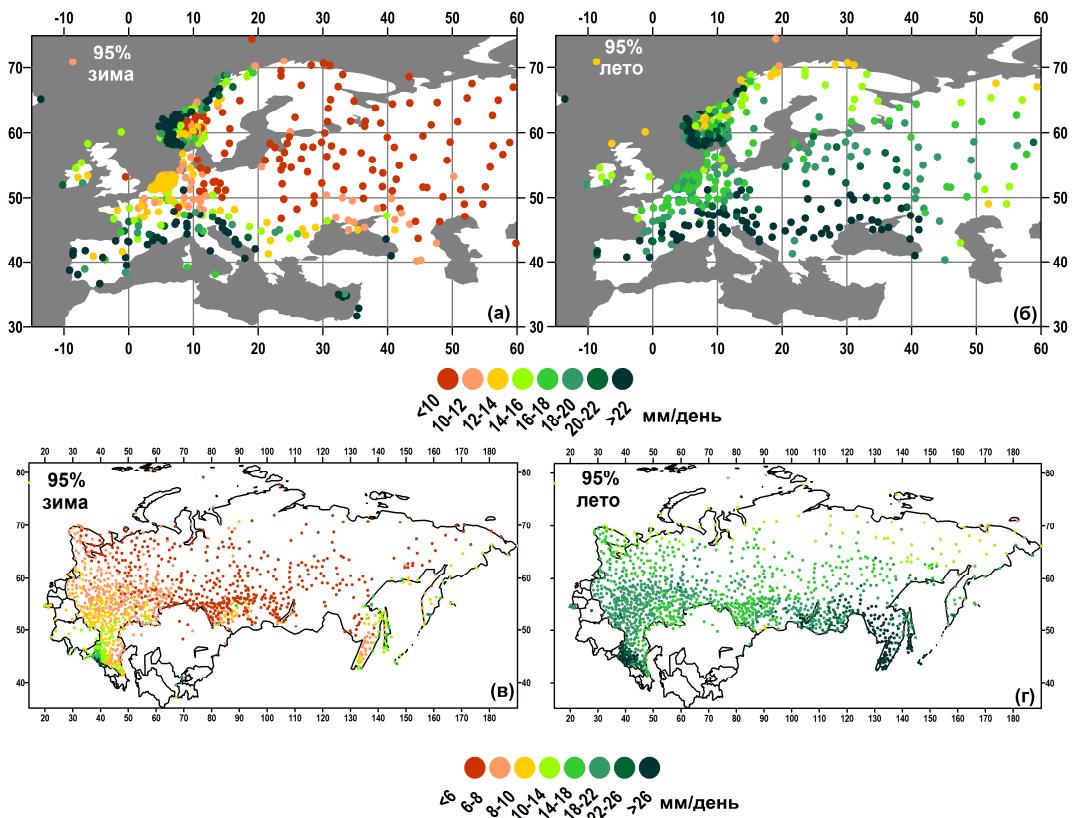


Рисунок 8. Пространственное распределение абсолютных экстремальных значений осадков по данным ECA&D за период с 1950 по 2009 гг. зимой (а) и летом (б) и по данным Росгидромета за период с 1966 по 2012 гг. зимой (в) и летом (г) (мм/день)

Используя предложенное во второй главе РЧВ, были выполнены оценки относительной экстремальности осадков для всей территории Евразии по разным данным. В качестве примера на рис. 9а,б, показано пространственное распределение нового индекса $R95tt$ по данным ECA&D и разницы между традиционным индексом $R95pTOT$ и индексом $R95tt$ (рис. 9в,г). Зимой (рис. 9а) значения $R95tt$ изменяются от 15-17% на севере европейской части России до 23% в южных районах Европы. В среднем по территории Европы значения $R95tt$ составляют 19-23%. Разницы между индексами $R95pTOT$ и $R95tt$ (рис. 9в,г) в Европе составляют 2-6% и увеличиваются в европейской части России (>10%), что связано, в частности, с влиянием на оценку $R95pTOT$ большого количества пропусков в измерениях и завышения вклада 5% самых влажных дней в общее количество осадков.

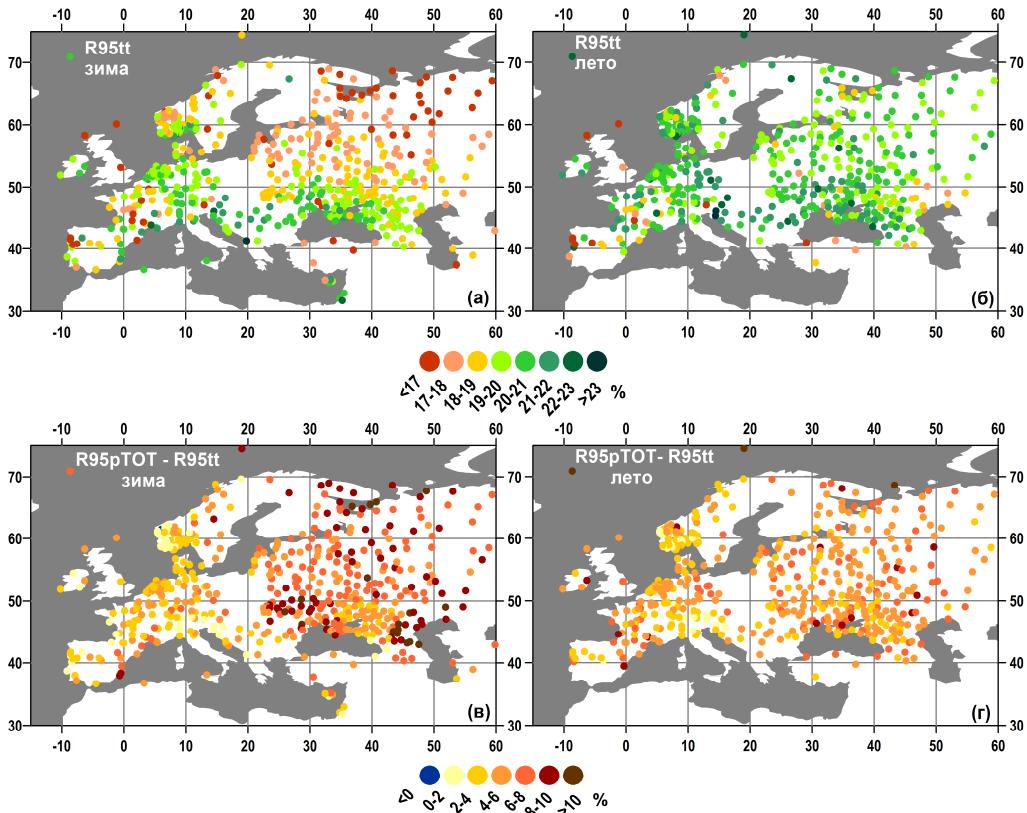


Рисунок 9. Пространственное распределение индекса $R95tt$ зимой (а) и летом (б), разности между индексами $R95pTOT$ и $R95tt$ зимой (в) и летом (г) по данным ECA&D за период с 1950 по 2009 гг. (%)

Пространственное распределение длительности очень длинных влажных периодов, соответствующих 95-му процентилю из УГР и УГРЧ показано на рис. 10. Максимальная длительность очень долгих периодов с осадками наблюдается на Атлантическом побережье Скандинавии и составляет более 12 дней зимой и 9-10 дней летом. Вклад наиболее длительных влажных и сухих периодов в общее количество дней с осадками (рис. 10в,г) показывает, насколько экстремальной была продолжительность влажных или сухих периодов.

Пространственное распределение длин периодов, соответствующих 95-му процентилю из УГР (рис. 10а,б) и длин периодов, обеспечивающих 95%-ный вклад в общее число дней с осадками (рис. 10в,г) по ЧУГР обнаруживают количественные различия. Зимой в Скандинавии и Великобритании 95% всех влажных дней формируется периодами с длительностью около 20 дней (при

максимуме 22 дня), в то время как значения 95-го процентиля, полученного по УГР, составляет лишь 14 дней. В северной части континентальной Европы 95% влажных дней формируются периодами длительностью до 9 дней зимой и до 8 дней летом.

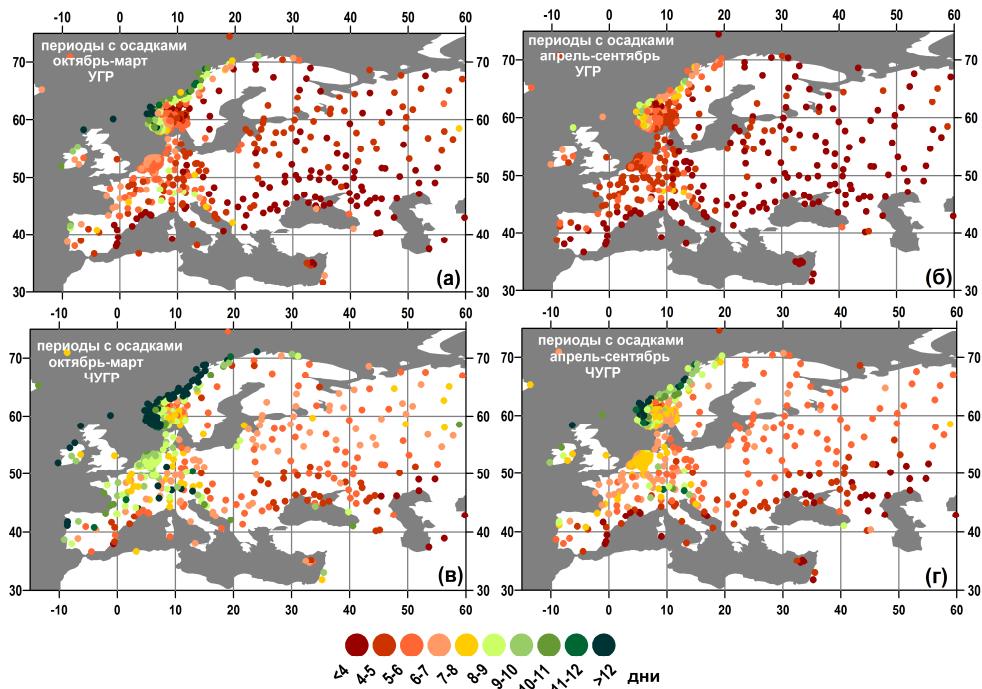


Рисунок 10. Пространственное распределение длительности (дни) влажных периодов соответствующих 95-му процентилю из УГР (а,б) и длин периодов, обеспечивающих 95%-ный вклад в общее число дней с осадками, оцененный по ЧУГР (в,г) зимой (а,в) и летом (б,г) по данным ЕСА&Д за период с 1950 по 2009 гг.

Основные результаты, изложенные в Главе 3, опубликованы в работах *Zolina et al. (2008)*, *Zolina et al. (2009)*, *Zolina et al. (2010)*, *Золина (2011)*, *Zolina (2012)*, *Zolina et al. (2013)*, *Zolina et al. (2014)*, *Золина и Булыгина (2016)*.

В четвертой главе «Основные закономерности климатического распределения характеристик средних и экстремальных осадков по различным данным» анализируются проблемы сопоставления характеристик осадков по различным типам данных. Разработанная методология анализа характеристик экстремальных осадков используется для оценки возможностей разных реанализов воспроизводить экстремальные осадки. Показано, что реанализы существенно занижают значения абсолютных экстремальных

осадков. Реанализ NCEP-R2 обнаруживает наибольшие значения экстремальных осадков (99-й и 99.9-й процентили), превышающие соответствующие величины для NCEP-R1 на 2-5 мм/день и ERA-40 на 6-10 мм/день при самых больших разницах (8-10 мм/день) наблюдающихся в Скандинавии на юге Европы. NCEP-R2 показывает наиболее близкие значения экстремальных осадков по отношению к данным станций. Различия для 99-го процентиля составляют 5-8 мм/день в центральной и до 15-18 мм/день в южной Европе, что на 15-20% меньше, чем для других реанализов. Это, однако, связано с существенным завышением средних значений осадков в данном реанализе (в среднем 1-3 мм/день по сравнению с NCEP-R1). Зимой согласованность между данными реанализов и наблюдениями на станциях существенно лучше, чем летом, что связано с недостаточно точным описанием в моделях конвективных процессов, преобладающих в осадкообразовании в летний период. Хотя осадки не ассимилируются в моделях реанализов, различия в методах усвоения (например 3DVar и 4DVar), а также в объемах и типах усваиваемой информации о других атмосферных параметрах могут приводить к существенным различиям, которые проанализированы в работе для нескольких реанализов.

Также проведено сравнение характеристик экстремальных осадков по спутниковым массивам данных с характеристиками, рассчитанными по данным наблюдений на станциях. Анализ показал, что зимой спутниковые данные существенно завышают значения экстремальных осадков, а летом – очень сильно занижают. Из двух анализируемых массивов спутниковых данных PERSIAN-CDR показывает лучшее совпадение с данными станций, чем GPCP. Для массива PERSIAN-CDR различия, например над территорией России, составляют 5-20%, за исключением юга Европейской территории, где разницы достигают 80-90%, что связано с большой пространственной неоднородностью полей осадков в условиях гористого рельефа.

Отдельно рассмотрены характеристики осадков над Мировым океаном по данным 5 реанализов и 2 массивов спутниковых данных. Традиционный анализ осадков над океанами основан на сравнении средних величин осадков [Bosilovich *et al.*, 2008]. Впервые выполнен анализ, включающий сравнения распределения числа дней с осадками, значений осадков разной интенсивности и экстремальных осадков. Было показано, что относительно небольшие различия в средних значениях могут сопровождаться сильными различиями в количестве влажных дней и интенсивности осадков. Так, реанализ NCEP-R2, характеризующийся малым числом влажных дней, демонстрирует намного более сильную интенсивность осадков, чем ERA-Interim и MERRA, которые характеризуются большим числом влажных дней. Это приводит к относительно низким значениям интенсивности осадков по сравнению со спутниковыми данными. Самые большие различия в интенсивности среди всех реанализов по отношению к TRMM наблюдаются для реанализов NCEP-R1 и NCEP-R2 и составляют 3-9 мм/день. Это показывает определяющую роль в реанализах слабых осадков, генерируемых в ходе инициализации моделей прогноза и не отражающих реальности.

Основные результаты, изложенные в Главе 4, были опубликованы в статьях *Zolina and Gulev (2003)*, *Zolina et al. (2004)*, *Zolina et al. (2008)*, *Zolina et al. (2009)*, *Zolina et al. (2014)*, *Lockhoff et al. (2014)*, *Dolant et al. (2018)* и в работе *Sommer et al. (2018)*, принятой к печати.

В пятой главе «Основные закономерности климатической изменчивости атмосферных осадков» выполнено детальное исследование климатической изменчивости характеристик осадков над континентами и Мировым океаном по различным данным. Для достоверной оценки трендов были развиты методы анализа чувствительности оценок трендов к пропускам в данных, а также методы оценивания статистической значимости трендов. Для оценки влияния пропусков была разработана процедура, основанная на методе Монте-Карло и позволяющая моделировать характеристики пропусков в

наблюдениях, сохраняя статистические характеристики исследуемых рядов. Было получено, что для достоверного воспроизведения изменчивости количество пропусков для сезона не должно превышать 40.

В работе использовалось несколько параметрических и непараметрических тестов и критериев для оценивания значимости трендов. Учитывая, что параметрический *t*-тест Стьюдента обладает рядом ограничений (требование независимости анализируемых характеристик в выборке и гауссности распределения совокупности, причем с необходимостью устойчивости оценки дисперсии σ^2 для всей выборки), дополнительно использовались непараметрические тесты Вилконсона [Wilcoxon, 1945] и Манн-Кендала [Mann, 1945], основанные на ранговых статистиках и позволяющие оценивать статистическую значимость без предположения о характере распределения исходной выборки. Помимо тестирования собственно нулевой гипотезы (наличие или отсутствие тренда в выборке), важным элементом была оценка доверительных интервалов для величин трендов с помощью коэффициента Хайashi [*reliability ratio, Hayashi, 1982*]. Важным элементом анализа трендов было оценивание групповой значимости оценок трендов, что принципиально, поскольку анализируются изменения, происходящие в достаточно больших районах. Оценивание групповой значимости [Livezey and Chen, 1983] основывалось на предположении, что вероятность того, что r индивидуальных оценок значимости в каждом испытании (например, в ряде наблюдений на одной станции) из n испытаний распределена биномиально в соответствии с функцией распределения:

$$P(X \leq x) = \sum_{r=0}^x \binom{n}{r} p^r (1-p)^{n-r}, \quad (20)$$

где p – вероятность успешности индивидуального испытания. Эта оценка использовалась в работе для учета взаимозависимости временных рядов и уменьшения ошибки второго рода [Wilks, 2006, 2016; Perneger, 1998; Morgan,

2007]. Исследование долгопериодной изменчивости характеристик экстремальных осадков позволило количественно оценить их изменения на территории Евразии за последние десятилетия. Показано, что максимальное увеличение экстремальных осадков наблюдается в районе Альп, в северных районах европейской части России и в южной части Дальневосточного округа в бассейне реки Амур (более 8% в десятилетие). Анализ групповой значимости показал устойчивый рост экстремальных осадков на всей территории Европы и России на уровне более 98% в зимний период. В центральной Европе летом возникает устойчивый кластер отрицательных трендов экстремальных осадков (7% в десятилетие), что свидетельствует о наличии сезонности в трендовых изменениях экстремальных осадков. Детальный анализ сезонности в центральной Европе был выполнен на основе станций DWD и включал оценки групповой значимости и исследование чувствительности трендов к началу и концу периода наблюдений. Показано, что в областях с выраженной сезонностью трендовых изменений экстремальных осадков зимний рост происходит за счет изменения формы функции распределения (увеличение сильных осадков и уменьшение слабых), тогда как летнее уменьшение связано с уменьшением средней интенсивности при относительно неизменной форме распределения.

Была исследована долгопериодная изменчивость относительной экстремальности, показавшая повсеместное увеличение индекса $R95tt$ (в среднем 4-5% в десятилетие). Показано, что климатический сигнал для индекса $R95tt$ менее устойчив по сравнению с характеристиками абсолютной экстремальности осадков: количество станций со статистически значимыми трендами намного меньше, что снижает групповую значимость обнаруженного сигнала. Выполнен анализ связи стандартного индекса относительной экстремальности $R95tot$ и нового индекса $R95tt$ с динамикой крупномасштабной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе и показано, что новый индекс обнаруживает устойчивую связь с Северо-Атлантическим колебанием

(коэффициенты корреляции до 0.73), что свидетельствует о тесной связи относительной экстремальности с интенсивностью циклонической активности и влагопереноса с акватории Атлантики.

В течение последних десятилетий существенно изменилась временная структура осадков – дни с осадками консолидировались в более продолжительные периоды, длительность которых увеличивалась на 4-8% в десятилетие. С помощью моделирования методом Монте-Карло было показано, что увеличение количества дней с осадками не влияет на эту увеличение длительности периодов с осадками. Увеличение общего количества осадков за последние 60 лет происходило за счет осадков, выпавших в течение более длинных периодов. При этом происходила перестройка функции распределения длин влажных периодов: увеличение количества длинных периодов с осадками сопровождалось уменьшением числа коротких периодов (рис. 11). Было показано, что длительность сухих периодов увеличивается в центральной Европе и в Европейской части России (4-7% в десятилетие), что потенциально может увеличить риск возникновения засух. Уменьшение длительности сухих периодов наблюдается в Скандинавии и северной части Франции.

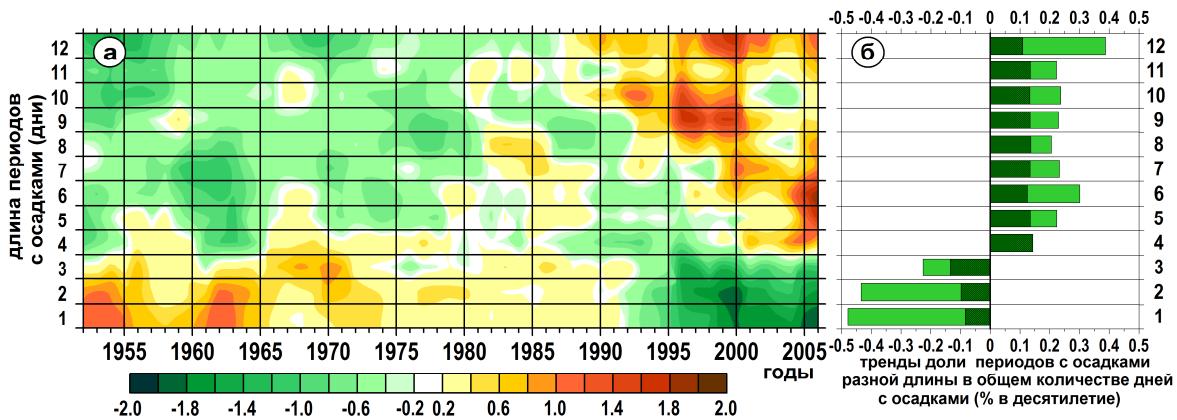


Рисунок 11. (а) Нормализованные аномалии доли количества дней с осадками для периодов разной продолжительности в общем количестве влажных дней на Европейском континенте по данным ECA&D, (б) тренды нормализованных аномалий длительности периодов с осадками (светло-зеленый цвет) вместе с оценками их значимости (темно-зеленый цвет) на уровне 95% (t -тест Стьюдента)

Совместное исследование динамики сухих и влажных периодов позволило впервые выявить феномен одновременного увеличения или

сокращения продолжительности и влажных, и сухих периодов. Были выявлены районы (Нидерланды и северо-восток Европейской части России), где наблюдается одновременное увеличение длительности как влажных, так и сухих периодов (рис. 12), что свидетельствует об одновременном увеличении риска выпадения продолжительных сильных дождей и возникновения засух. Также были выявлены районы одновременного уменьшения длительности влажных и сухих периодов (южная Скандинавия в летний сезон, рис. 12б).

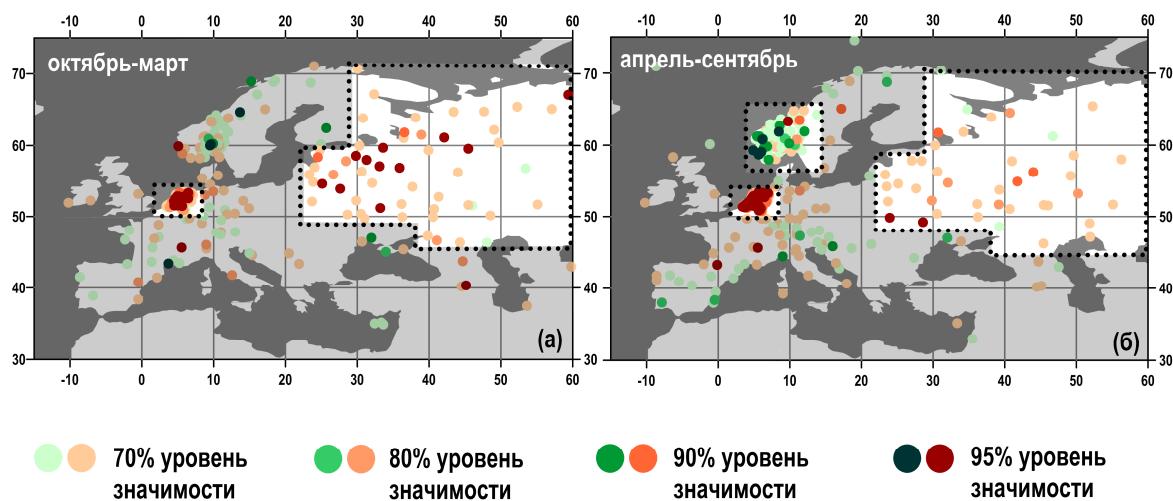


Рисунок 12. Станции, для которых линейные тренды продолжительности влажных и сухих периодов, показывают одинаковый знак в зимний (а) и летний (б) сезоны за период с 1950 по 2009 гг. Уровень значимости трендов (по t-тесту Стьюдента) показан кружками разных цветов. Красным показаны положительные тренды, зеленым – отрицательные. Разные уровни значимости трендов показаны разной интенсивностью цвета. Отмеченные пунктиром полигоны показывают районы одновременного увеличения или уменьшения длительности влажных и сухих периодов

Для объяснения этого феномена была предложена концептуальная модель, легко иллюстрируемая перераспределением числа бус на нитке (рис. 13), когда перегруппировка отдельных бус в серии (увеличение длительности влажных периодов) приводит к одновременному увеличению расстояний между сериями (длительность сухих периодов). И наоборот, фрагментирование консолидированных серий бус на более короткие серии приводит к одновременному уменьшению расстояний между сериями. Показано, что существует возможность описания этого процесса с помощью цепей Маркова.

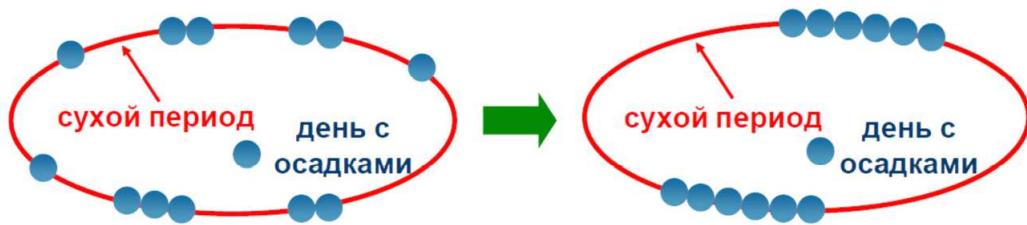


Рисунок 13. Схематический механизм одновременного изменения длительности сухих и влажных периодов на примере перегруппировки бус на нитке.

В работе выполнена валидация характеристик изменчивости экстремальных осадков по данным реанализов и спутниковых наблюдений. Было показано, что тренды в характеристиках экстремальных осадков и параметров гамма-распределения в реанализах и по данным станций сильно отличаются друг от друга. Зимой реанализы показывают наилучшую согласованность между собой и со станционными измерениями, а существенное рассогласование между реанализами отмечается летом, когда в осадкообразовании преобладают мезомасштабные конвективные процессы, плохо параметризуемые в моделях. Анализ характеристик изменчивости осадков по спутниковым данным и по данным измерений на станциях показал, что данные GPCP потенциально могут быть использованы для оценки изменчивости экстремальных осадков, поскольку характеристики межгодовой изменчивости достаточно хорошо согласованы в данных GPCP и станционных наблюдениях. Для массива PERSIANN (начиная с 1983 г.) для оценок трендов могут отмечаться противоположные по знаку тренды по сравнению со станциями, что особенно сильно проявляется в центральной России, где станции показывают рост экстремальных осадков, а данные PERSIANN – уменьшение. Межгодовая изменчивость средних значений осадков в PERSIANN, также как и в GPCP, хорошо совпадает с изменчивостью по данным наблюдений на станциях, однако при рассмотрении экстремальных осадков эта согласованность уменьшается на 10-25% по сравнению с корреляциями средних величин.

В работе впервые был проведен анализ изменчивости статистической структуры осадков над океаном, включающий рассмотрение числа дней с осадками и интенсивность осадков по данным реанализов и спутниковых наблюдений. Показано, что межгодовая изменчивость средних осадков в реанализах сильно зависит от однородности объема и типов ассиимилируемых данных. Из пяти рассмотренных реанализов (NCEP-R1, NCEP-R2, ERA-Interim, MERRA, NCEP-CFSR) только ERA-Interim показывает незначительное влияние изменений в усвоении данных моделью на межгодовую изменчивость и демонстрирует долгопериодную изменчивость, близкую к GPCP. Межгодовая изменчивость в количестве дней с осадками и интенсивности для реанализов и спутниковых данных над океаном согласована друг с другом намного хуже, чем средние значения. При этом частота и интенсивность сильных осадков (превышающих 90-й процентиль) показывает значительно лучшую согласованность между реанализами и спутниковыми данными.

Основные результаты, изложенные в Главе 5, были опубликованы в *Zolina et al. (2004)*, *Zolina et al. (2005)*, *Loeptien et al. (2008)*, *Zolina et al. (2009)*, *Zolina et al. (2010)*, *Золина (2011)*, *Zolina (2012)*, *Groisman et al. (2013)*, *Zolina et al. (2013)*, *Lockhoff et al. (2014)*, *Zolina (2014)*, *Zolina et al. (2014)*, *Матвеева и др. (2015)*, *Золина и Булыгина (2016)*, *Groisman et al. (2017)* и в статье, принятой к печати, *Sommer et al. (2018)*.

Шестая глава «Связь динамики осадков с атмосферным влагопереносом и испарением» посвящена исследованию роли осадков, включая экстремальные, в региональном атмосферном цикле влаги. Было выполнено исследование атмосферного цикла влаги для трех регионов – циркумполярной Арктики, Антарктики и Красного моря, где, помимо осадков большая роль принадлежит также переносам влаги в атмосфере и испарению. Все три региона характеризуются относительно небольшими осадками, однако относительная экстремальность этих осадков может быть очень высокой. Существующие оценки гидрологического цикла в Арктике [*Kattsov and Walsh*,

2000; Kattsov *et al.*, 2005, 2007; Cullather and Bosilovich, 2011; Мелешко и др., 2016] с одной стороны, обладают существенными (и вполне естественными) неопределенностями, а с другой не включают всей доступной информации или ограничиваются оценками отдельных членов. Важной особенностью Арктики и Антарктики является очень малое количество данных прямых измерений осадков и сильные неопределенности оценок осадков по данным реанализов. Поэтому для оценки атмосферного водного цикла здесь более эффективно применять расчеты переносов влаги в атмосфере. Для выполнения оценок переносов влаги была разработана методология [Dufour *et al.*, 2016], основанная на эйлеровом подходе и учитывающая неопределенности расчетов переносов влаги в более ранних работах. Был модифицирован традиционный эйлеров подход [Trenberth *et al.*, 2011; Cullather and Bosilovich, 2012], основанный на использовании для области R с границей B проинтегрированного уравнения баланса влаги:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_R \int_0^{p_s} q \frac{dp}{g} ds = \oint_B \int_0^{p_s} q V_n \frac{dp}{g} dl + \iint_R \int_0^{p_s} (P - E) ds, \quad (21)$$

где p_s – давление у поверхности, q – удельная влажность, P – осадки, E – испарение, g – ускорение свободного падения. Главной проблемой численной реализации (21) для реанализов является расчет для низких уровней, требующий учета топографии, задаваемой спектральными гармониками. Во всех реанализах, начиная с JRA-25 используются гибридные σ -уровни (η -уровни), причем k -й η -уровень определяется как $p_k = A_k + B_k p_s$ [Stepaniak, 2008], где k меняется от 1 (верхний уровень) до N (уровень, ближайший к поверхности), A_k и B_k – константы, из которых B_k соответствует обычным σ -уровням, начиная с величины близкой к 1 у поверхности и уменьшаясь с высотой, а A_k соответствует приращениям давления. В этом случае толщина, соответствующая η -уровню традиционно получается аппроксимацией

основанной на полуцелых индексах $\Delta p_k = p_{k+0.5} - p_{k-0.5}$, что дает для вертикального интеграла переменной $f(p)$:

$$\int_0^{p_s} f(p) dp \approx \sum_{n=1}^N f(p) (A_{k+0.5} - A_{k-0.5} + (B_{k+0.5} - B_{k-0.5}) \cdot p_s). \quad (22)$$

Принимая во внимание неопределенности использования (22) в ряде реанализов, в работе была предложена более точная аппроксимация:

$$\int_0^{p_s} f(p) dp \approx \sum_{n=n_0}^{N-1} \frac{1}{2} (f(p_{n+1}) + f(p_n)) (p_{n+1} - p_n) + f(p_{n_0}) (p_{n_0} - p_s), \quad (23)$$

которая учитывает поверхностную топографию. Следующим важным методологическим шагом было введение вместо традиционного рейнольдсовского разложения компонентов переноса влаги [Peixoto and Oort, 1992], предполагающего разделение суммарного потока влаги на средний и вихревой компоненты, более сложного разложения (24):

$$\langle \bar{qv} \rangle = \langle \bar{q'v'} \rangle + \langle \bar{q}^* \bar{v}^* \rangle + \langle \bar{q} \rangle \langle \bar{v} \rangle^* + \langle \bar{q} \rangle \langle \bar{v} \rangle, \quad (24)$$

где члены правой части соответствуют переносу синоптическими вихрями, стационарными вихрями, вертикальными круговоротами (ячейками Гадлея, Ферреля и полярными вертикальными ячейками) и переносом средним движением, который обращается в ноль, поскольку требуется выполнение условия сохранения массы. Анализ и контроль сохранения массы на каждом шаге интегрирования были еще одним новым элементом развитой в работе методологии оценки адвекции влаги. Контроль сохранения массы проводился интегрированием уравнения:

$$\operatorname{div} \vec{u} + \frac{\partial w}{\partial p} = 0, \quad (25)$$

где w – вертикальная скорость в координатах давления, \vec{u} – горизонтальный ветер. Учитывая, что многими процессами можно пренебречь с высокой степенью точности, интегрирование (22) приводит к соотношениям:

$$\begin{aligned} \int_0^{p_N} \iint_{\phi > \phi_0} \operatorname{div} \vec{u} ds \frac{dp}{g} + \iint_{\phi > \phi_0} \int_0^{p_N} \frac{\partial w}{\partial p} \frac{dp}{g} ds = 0 \\ \int_0^{p_N} \int_0^{2\pi} v(\phi_0) d\lambda \frac{dp}{g} = \iint_{\phi > \phi_0} w(p_N) ds \end{aligned} \quad (26)$$

Для баланса массы было получено следующее соотношение, которое и использовалось при расчетах:

$$[\langle v \rangle] \cdot \int_{p_s}^{p_N} \int_0^{2\pi} d\lambda \frac{dp}{g} = \int_{p_s}^{p_N} \int_0^{2\pi} v(\phi_0) d\lambda \frac{dp}{g} + \iint_{\phi > \phi_0} w(p_N) ds. \quad (27)$$

Использование развитой методологии позволило впервые получить согласованные оценки среднеклиматических переносов влаги в Арктике и Антарктике и их межгодовой изменчивости за период с 1979 по 2013 гг. на основе всех существующих реанализов и данных атмосферного зондирования IGRA. Для района Арктики было получено хорошее согласование между реанализами и данными радиозондирования для пространственного распределения потоков влаги, их вертикальной структуры и временной изменчивости, однако количественно реанализы завышают оценки потоков влаги на 6-13%. Рассогласование потоков влаги в Антарктике намного больше, что связано с очень малым количеством данных, доступных для усвоения моделями в этом районе. В работе был проанализирован дисбаланс между конвергенцией влаги и величиной «осадки минус испарение». Оценки стандартных отклонений, полученных для разности «осадки минус испарение», в Арктике примерно в 10 раз больше, чем для конвергенции потоков влаги (45 мм/год и 5.1 мм/год, соответственно). В Антарктике оценки конвергенции

влаги меняются от 117 до 156 мм/год для разных реанализов, а оценки величины «осадки минус испарение» от 108 до 178 мм/год. Поток влаги в Арктике направлен на север везде кроме Канадского архипелага. В Антарктике доминируют потоки влаги в южном направлении за исключением района полярного вихря, расположенного на леднике Росса ($150^{\circ}\text{з.д.}-160^{\circ}\text{в.д.}$). Было впервые показано, что потоки влаги могут проникать вглубь Антарктического континента в районе Антарктического полуострова и ледника Росса.

В работе выполнен также детальный анализ роли различных компонентов в меридиональном переносе влаги в рамках разложения (24). Транспорт влаги в Арктику в основном осуществляется синоптическими и мезомасштабными вихрями, ответственными за 88-95% общего потока на 70°с.ш. (рис. 14а,15а) и за 90% общего переноса влаги в Антарктике вглубь континента (рис. 14б,15б). Вертикальные профили различных компонентов меридионального переноса влаги для Арктики (70°с.ш.) и Антарктического щита показаны на рис. 15. В Арктике максимум суммарного меридионального переноса влаги обнаруживается на высотах 900-800 гПа, причем как в области максимума, так и выше до уровня 200 гПа вихревой перенос ответственен за 85-90% суммарного переноса. Это подтверждается всеми реанализами, согласованными в пределах 10% оценки переноса. В нижней части пограничного слоя при этом отмечается направленный на юг перенос крупномасштабными вертикальными ячейками циркуляции. Этот поток полностью компенсирует направленный на север поток за счет вихрей, результатом чего является близкий к нулю суммарный меридиональный перенос у земли. Вклад стационарных вихрей значим только в нижней тропосфере, где он составляет до 20% суммарного переноса.

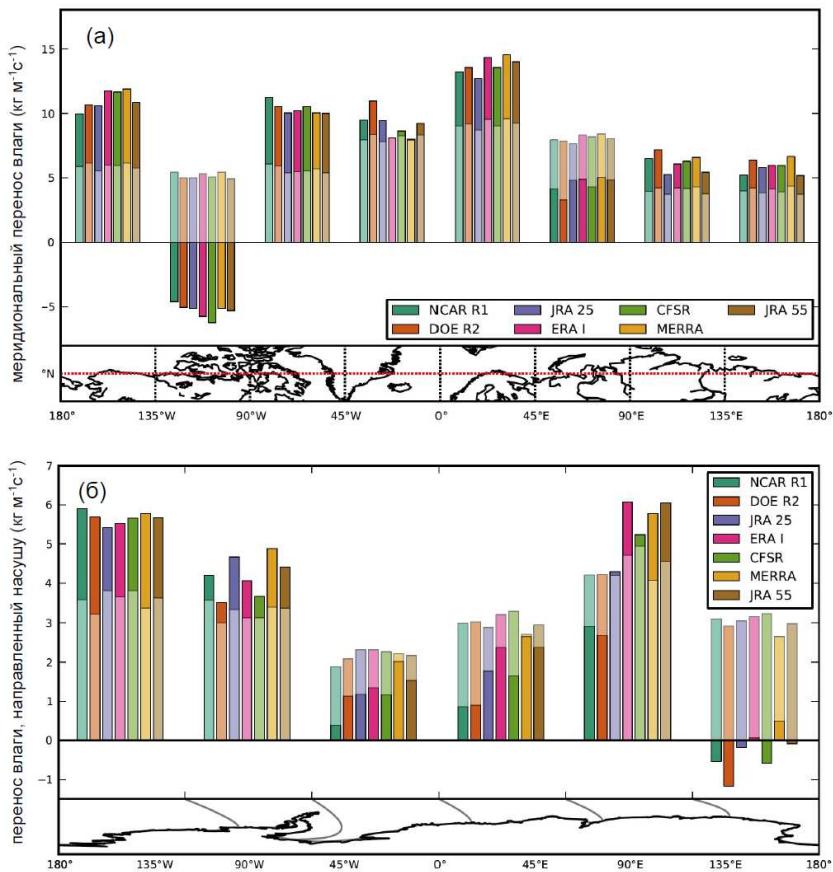


Рисунок 14. Меридиональное распределение вертикально проинтегрированного потока влаги (столбики темного цвета) и компонент переноса синоптическими вихрями, полученный из разложения (24) (осветленные столбики) на 70°с.ш. (а) и вдоль побережья Антарктиды (б) в разных реанализах за период с 1979 по 2013 гг.

Вертикальное распределение интенсивности различных компонентов потоков влаги в Антарктике принципиально отличается от соответствующего распределения в Арктике (рис. 15б). Максимум суммарного переноса направлен на юг и смещен на высоты 700-800 гПа. При этом реанализы NCEP-R2, CFSR и JRA25 обнаруживают этот максимум на высотах, соответствующих геопотенциальной высоте менее 700 гПа. В приземном слое до высоты 900 гПа суммарный поток направлен на север с максимумом, примерно, на 950-975 гПа. Такой профиль суммарного меридионального переноса влаги сформирован в свободной тропосфере суммарным эффектом переноса синоптическими и стационарными вихрями, в нижнем слое эффектом вертикальных ячеек циркуляции, выраженным здесь сильнее, чем в Арктике.

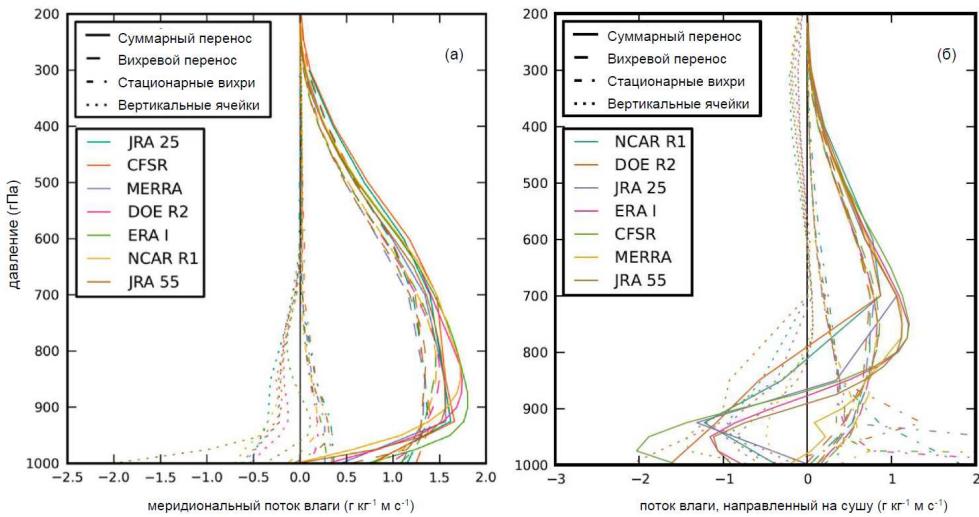


Рисунок 15. Вертикальные профили компонентов разложения (24) для района севернее 70°с.ш. (а) и вдоль побережья Антарктического ледяного щита (б)

В Арктике в летний сезон перенос практически удваивается по отношению к зимнему периоду, причем все реанализы показывают очень похожие результаты в воспроизведении сезонного цикла. В Антарктике сезонный цикл выражен слабее из-за значительно меньших сезонных колебаний влагозапаса. Анализ межгодовой изменчивости переносов влаги показал уменьшение переноса в Арктику в течение периода 1979-2013 (рис. 16а). При этом влагозапас Арктической атмосферы существенно увеличивался от 1.5 до 1.9% в десятилетие (рис. 16б), что говорит о том, что источники увеличения запаса влаги в Арктике преимущественно локальные и связаны в первую очередь, с изменениями неадиабатического испарения (увеличение которого, например, в реанализе NCEP-R2 составляло 9.7% в десятилетие) и относительно небольшим увеличением осадков, не компенсирующим эффект испарения. При этом адвективные процессы, связанные с переносами влаги атмосферными циклонами, играют второстепенную роль, что не подтверждает ранее полученные результаты [Sorteberg and Walsh, 2008], хотя относительная роль вихревого компонента в формировании суммарного переноса влаги возрастает от 80% в 1980-е гг. до почти 95% в 2010-е гг., не приводя к значимому эффекту в суммарном переносе влаги. Для Антарктики не представляется возможным

сделать обоснованные выводы о межгодовой изменчивости переносов влаги, так как разброс значений из разных реанализов превышает оценки межгодовой изменчивости.

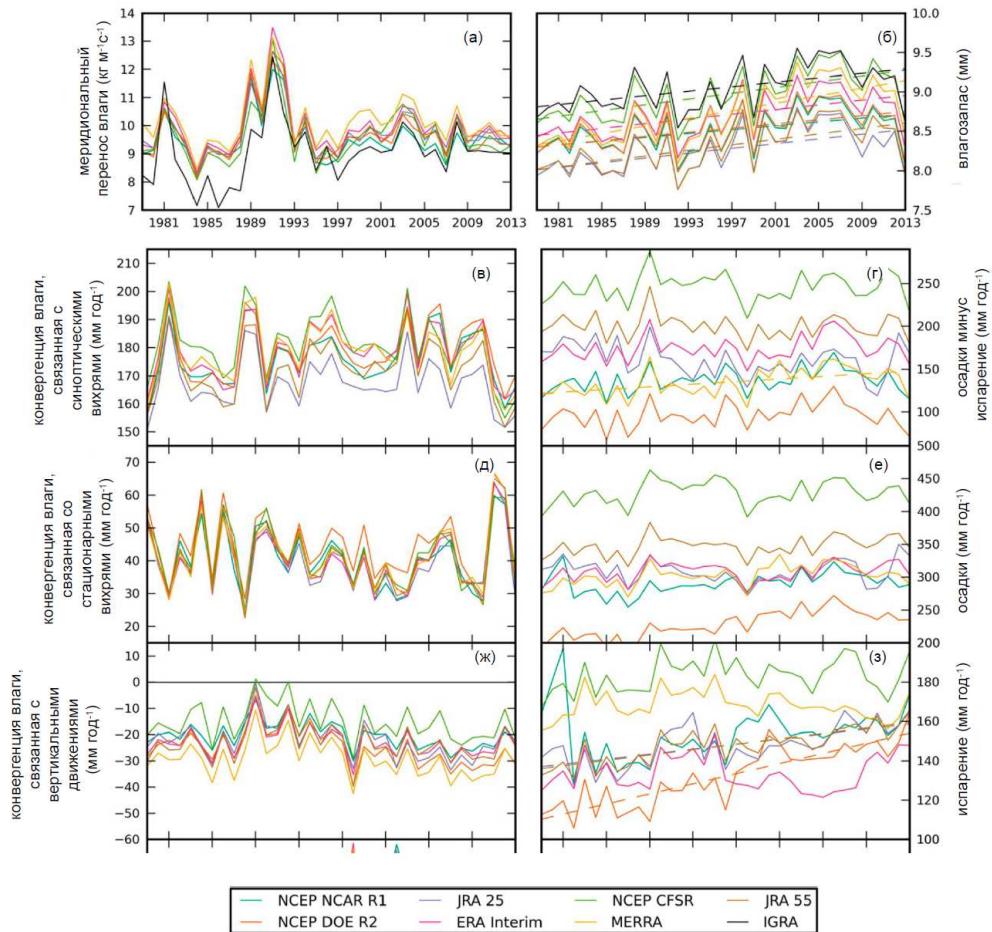


Рисунок 16. Временные ряды меридионального переноса влаги ($\text{кг м}^{-1} \text{с}^{-1}$) (а), влагозапаса (мм) (б), конвергенция влаги севернее 70°с.ш. для переносов, связанных с синоптическими вихрями (в), переносов, связанных со стационарными вихрями (д) и переносов, связанных с вертикальными движениями (ж) (мм год^{-1}), полученных из компонентов разложения (24); (г) «осадки минус испарение» (мм год^{-1}), (е) осадки (мм год^{-1}), (з) испарение (мм год^{-1}) для реанализов и радиозондов за период 1980-2013 гг.. Пунктиром показаны линии регрессии, если тренды статистически значимы на уровне 95% (t -тест Стьюдента)

В работе также была решена задача интегрирования дивергенции влаги для контура на примере Красного моря, что является попыткой использования эйлеровского подхода [Trenberth *et al.*, 2011; Zahn and Allan, 2013] «наоборот» и позволяет рассматривать роль моря в региональном гидрологическом цикле. Новым методологическим подходом стало интегрирование потоков влаги по контуру моря двумя отдельными интегралами по восточному и западному

побережьям, что позволило рассмотреть весь спектр механизмов, формирующих региональный гидрологический цикл [Zolina *et al.* 2017]. Кроме того, была проанализирована роль переносов влаги в формировании регионального гидрологического цикла в пограничном слое и в свободной тропосфере. Для Красного моря уравнение (21) рассматривалось для конечной области A , ограниченной береговой линией L , в виде:

$$\iint_A \frac{\partial W}{\partial t} da + \oint_L VIMF \cdot \vec{n} dl = \iint_A (E - P) da, \quad (28)$$

где $VIMF = \mathbf{v}q$ – вертикально проинтегрированный поток влаги. Заметим что проинтегрированная по области A дивергенция потока влаги

$VIMF = \nabla \cdot VIMF = \nabla \cdot \frac{1}{g} \int_{p_{\text{toa}}}^{p_{\text{surf}}} vq dp$ и величина $\oint_L VIMF \cdot \vec{n} dl$ не точно равны друг другу,

как требует того теорема Остроградского-Гаусса, что является результатом использования численной аппроксимации (20), и что также отмечалось *Seager and Henderson, 2013*. Далее второй член левой части уравнения (28) был аппроксимирован для береговой линии моря как:

$$\oint_L VIMF \cdot \vec{n} dl = \int_{L_{EC}} VIMF \cdot \vec{n} dl_{EC} + \int_{L_{WC}} VIMF \cdot \vec{n} dl_{WC}, \quad (29)$$

где члены правой части соответствуют интегрированию вдоль восточного (EC) и западного берегов (WC). Было показано, что для полной дивергенции влаги над морем уравнение (29) выполняется с точностью 2.0-3.5%. Далее анализировались переносы влаги через западный и восточный берег и для различных слоев по вертикали.

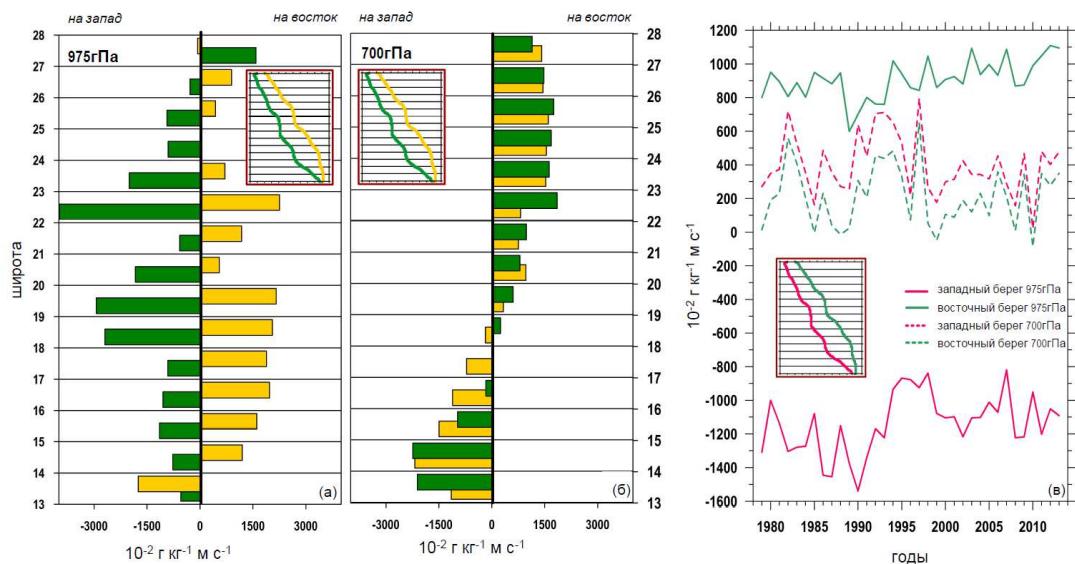


Рисунок 17. Переносы влаги в атмосфере ($\text{г} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$) вдоль западного (зеленым цветом) и восточного (желтым цветом) берегов на уровне 975 гПа (а) и 700 гПа (б) за период с 1979 по 2013 гг. Переносы в $\text{г} \text{кг}^{-1} \text{м} \text{с}^{-1}$ были осреднены для каждого градуса широты. (в) Временные ряды осредненного переноса влаги для западного (красным) и восточного (зеленым) берегов Красного моря на уровне 950 гПа (сплошные линии) и 700 гПа (пунктирные линии)

В работе получено, что перенос влаги с акватории Красного моря осуществляется двумя основными механизмами (рис. 17). Циркуляция бризового типа формирует дивергенцию влаги с зеркала моря, как через западное, так и через восточное побережье до уровня 850 гПа. Перенос влаги выше 850 гПа (с максимумом на уровне 650-700 гПа) управляет региональной циркуляцией, связанной с динамикой Аравийского антициклона, и его взаимодействия с ВЗК в районе моря, так называемой Красноморской зоной конвергенции (RSCZ), в результате чего влага переносится с северной части акватории Красного моря на Аравийский полуостров, а в центральной и южной частях – на Африку, формируя, в частности, сильные осадки в районе Эфиопских гор. При этом перенос влаги в нижней части пограничного слоя существенно более мощный, чем адвекция влаги в верхних слоях (рис. 17).

Вынос влаги с акватории Красного моря имеет выраженную межгодовую изменчивость. В 1997 г. наблюдался минимум, а затем с начала 1990-х до 2010-х гг. происходило резкое увеличение (примерно на 40%) транспорта влаги, что

было связано с усилением циркуляции бризового типа в приземном слое, интенсивность которой в значительной степени определялась межгодовой изменчивостью температуры поверхности Красного моря. В 1980-х гг. вынос влаги осуществлялся, в основном, на Аравийский полуостров, а начиная с середины 1990-х гг. как на Аравийский полуостров, так на Африку. Вынос влаги в слоях выше 850гПа в большой степени контролируется поведением центра высокого давления над Аравийской пустыней.

Основные результаты, изложенные в Главе 6, опубликованы в *Jung et al. (2003)*, *Loeptien et al. (2008)*, *Dufour et al. (2016)*, *Zolina et al. (2017)*, *Wegmann et al. (2018)*, *Collins et al. (2018)*.

В **Заключении** в сжатом виде сформулированы основные результаты работы:

1. Предложены новые метрики для статистического моделирования абсолютной и относительной экстремальности осадков, в частности новое вероятностное распределение частичного вклада (РЧВ) для оценки относительной экстремальности, что позволило предложить новый индекс относительной экстремальности *R95tt*, существенно более устойчивый, чем ранее использованные.

2. На основании использования новых метрик выполнены оценки абсолютной и относительной экстремальности осадков на Евроазиатском континенте за последние несколько десятилетий по данным наиболее полных измерений на осадкомерных постах, реанализам и спутниковым измерениям. Максимальные величины экстремальных осадков (95-й процентиль) отмечаются в Скандинавии, в южных районах Европы и на Дальнем Востоке и составляют более 26 мм/день. Наибольшие значения индекса относительной экстремальности обнаруживаются в районах с горным рельефом и составляют более 23%. Значения индекса относительной экстремальности летом, в среднем, на 30% выше, чем зимой. Реанализы, существенно занижают оценки

экстремальных осадков. Спутниковые данные зимой завышают значения экстремальных осадков, а летом – занижают.

3. Получены оценки межгодовой изменчивости абсолютной и относительной экстремальности осадков в Евразии по данным станционных наблюдений, реанализов и спутниковых измерений. Показано, что за период с 1960 по 2012 гг. на большей части территории Европы и России наблюдается увеличение, как абсолютной (до 8% в десятилетие), так и относительной экстремальности (до 5% в десятилетие). В Центральной Европе наблюдается сильная сезонность с увеличением экстремальных осадков зимой и уменьшением их значений летом на 7% в десятилетие. Оценки межгодовой изменчивости, полученные по данным реанализов и спутниковым данным, очень сильно отличаются от оценок, полученных по данным наблюдений на станциях. Для многих районов были получены тренды противоположных знаков.

4. Для статистического моделирования продолжительности влажных и сухих периодов (включая их совместные распределения) предложен новый подход, основанный на усеченном геометрическом распределении и связанном с ним распределении частичного вклада влажных и сухих периодов в общее количество влажных дней. Для этих распределений разработаны эффективные алгоритмы для оценивания параметров и интегрирования функций плотности вероятности.

5. Построены устойчивые оценки продолжительности влажных и сухих периодов на Евроазиатском континенте и исследована межгодовая динамика влажных и сухих периодов. Показано что, увеличение продолжительности влажных периодов (4-8% в десятилетие) связано с увеличением интенсивности экстремальных осадков (6-8% в десятилетие), а также что продолжительность влажных и сухих периодов на Европейском континенте может как

одновременно возрастать, так и одновременно уменьшаться. Предложена концептуальная модель совместной изменчивости влажных и сухих периодов.

6. Выполнен анализ статистической структуры осадков над Мировым океаном, включающий рассмотрение числа дней с осадками и интенсивность осадков, по данным реанализов и спутниковых данных. Установлено, что различия в числе влажных дней и интенсивности осадков существенно больше, чем в среднем количестве осадков. Показано, что межгодовая изменчивость средних осадков в реанализах сильно зависит от однородности объема и типов ассиимилируемых данных.

7. Разработан новый алгоритм расчета адвекции влаги в атмосфере, основанный на численной схеме, учитывающей топографию поверхности, и позволяющий уверено разделять переносы влаги на компоненты, связанные со средним потоком, синоптическими вихрями, крупномасштабными горизонтальными и вертикальными ячейками циркуляции.

8. По данным семи доступных реанализов и данных аэрологических зондирований IGRA оценены различные компоненты переноса влаги для Арктики и Антарктики. Показано, что транспорт влаги в Арктику на разных высотах в основном осуществляется синоптическими и мезомасштабными вихрями, ответственными за 88-95% общего потока. Обнаружено что при уменьшении и слабой изменчивости суммарного переноса, относительная роль вихревого переноса для Арктики возрастает от 80% в 1980-е гг. до 95% в 2010-е гг.. Показано, что источники увеличения запаса влаги в атмосфере Арктики носят преимущественно локальный характер и связаны с изменениями неадиабатического испарения, связанного с потеплением Арктики.

9. Выполнено исследование динамики гидрологического цикла над Красным морем. Показано, что перенос влаги с акватории Красного моря осуществляется двумя основными механизмами: циркуляцией бризового типа в нижней тропосфере и региональной циркуляцией, связанной с динамикой

Аравийского антициклона и его взаимодействия с внутритропической зоной конвергенции в верхней тропосфере. Показано, что межгодовые изменения дивергенции атмосферной влаги над Красным морем вызваны, главным образом, изменениями в интенсивности бризовой циркуляции, в значительной степени определяемой изменениями температуры поверхности, влияющей на изменения температурных градиентов между сушей и морем.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. Wegmann M., Orsolini Y., and Zolina O. Warm Arctic – cold Siberia: comparing the recent and the early 20th-century Arctic warmings.// Env. Res. Lett., 2018, vol. 13, 025009, doi: 10.1088/1748-9326/aaa0b7.
2. Collins M., Minobe S., Barreiro M., Bordoni S., Kaspi Y., Kuwano-Yoshida A., Keenlyside N., Manzini E., O'Reilly C.H., Sutton R., Xie S.P. and Zolina O. Challenges and opportunities for improved understanding of regional climate dynamics.// Nature Climate Change, 2018, vol. 8, pp. 101-108, doi:10.1038/s41558-017-0059-8.
3. Dolant C., Montpetit B., Langlois A., Brucker L., Zolina O., Johnson C.A., Royer A. and Smith P. Assessment of the Barren Ground Caribou die-off during winter 2015-2016 using passive microwave observations.// Geophys. Res. Lett., 2018, doi: 10.1029/2017GL076752.
4. Groisman P.Ya., Kicklighter D., Henebry G., Shugart H., Tchebakova N., Maksyutov S., Monier E., Gutman G., Gulev S.K., Qi J., Prishchepov A., Kukavskaya E., Porfiriev B., Shiklomanov A., Loboda T., Shiklomanov N., Nghiem S., Bergen K., Albrechtová J., Chen J., Shahgedanova M., Shvidenko A., Speranskaya N., Soja A., deBeurs K., Bulygina O., McCarty J., Zhuang Q. and Zolina O. Northern Eurasia Future Initiative (NEFI): Facing the Challenges and Pathways of Global Change in the 21st Century.// Progress in Earth and Planetary Science, 2017, vol. 4, doi:10.1186/s40645-017-0154-5.
5. Zolina O., Dufour A., Gulev S.K. and Stenchikov G. Regional hydrological cycle over the Red Sea in ERA-Interim reanalysis.// Journal of Hydrometeorology, 2017, vol. 18, pp. 65-83.

6. Dufour A., Zolina O. and Gulev S.K. Atmospheric moisture transport to the Arctic: assessment of reanalyses and analysis of transport components.// *Journal of Climate*, 2016, vol. 29, pp. 5061-5081.
7. Золина О.Г. и Булыгина О.Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России.// *Фундаментальная и прикладная климатология*, 2016, т. 1, с. 84-103.
8. Матвеева Т.А., Гущина Д.Ю. и Золина О.Г. Крупномасштабные индикаторы экстремальных осадков в прибрежных природно-экономических зонах европейской территории России.// *Метеорология и гидрология*, 2015, т. 11, с. 20-32.
9. Zolina O., Simmer C., Kapala A., Shabanov P., Becker P., Mächel H., Gulev S.K. and Groisman P. Precipitation Variability and Extremes in Central Europe: New View from STAMMEX Results.// *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2014, vol. 95, pp. 995–1002.
10. Zolina O. Multidecadal trends in the duration of wet spells and associated intensity of precipitation as revealed by very dense observational German network.// *Env. Res. Lett.*, 2014, vol. 9, doi:10.1088/1748-9326/9/2/025003.
11. Lockhoff M., Zolina O., Simmer C. and Schulz J. Evaluation of satellite-retrieved extreme precipitation over Europe using gauge observations.// *J. Climate*, 2014, vol. 27, pp. 607-623.
12. Groisman P.Y., Knight R.W. and Zolina O. Recent Trends in Regional and Global Intense Precipitation Patterns.// Academic Press: In: "Climate Vulnerability, 1st Edition Understanding and Addressing Threats to Essential Resources", edited by R. Pielke, 2013, pp. 25-52
13. Zolina O., Simmer C., Belyaev K., Gulev S.K. and Koltermann P. Changes in the duration of European wet and dry spells during the last 60 years.// *Journal of Climate*, 2013, vol. 26, pp. 2022-2047.

14. Zolina O. Changes in European Extreme Precipitation.// UK: IAHS Press, 2012, In: "Changes of Flood Risk in Europe", edited by Zbyszek Kundzewicz, pp. 97-120.
15. Золина О.Г. Изменение длительности синоптических дождевых периодов в Европе и Европейской части России с 1950 по 2008 годы и их связь с экстремальными осадками.// Доклады Академии Наук, 2011, т. 5, № 436, с. 690-695.
16. Zolina O., Simmer C., Gulev S.K. and Kollet S. Changing structure of European precipitation: longer wet periods leading to more abundant rainfalls.// Geophys. Res. Lett., 2010, vol. 37, L06704.
17. Zolina O., Detemmerman V. and Trenberth K.E. Improving the accuracy of estimation of climate extremes.// EOS Transactions, 2010, vol. 91, №51, p. 506.
18. Zolina O., Simmer C., Belyaev K., Kapala A. and Gulev S.K. Improving estimates of heavy and extreme precipitation using daily records from European rain gauges.// Journal of Hydrometeorology, 2009, vol. 10, pp. 701-716.
19. Loeptien U., Zolina O., Gulev S.K., Latif M. and Soloviov V. Cyclone life cycle characteristics over the Northern Hemisphere in coupled GCMs.// Clim. Dynamics, 2008, vol. 31, pp. 507-532.
20. Zolina O., Simmer C., Kapala A., Bachner S., Gulev S.K. and Maechel H. Seasonality of precipitation extremes over Central Europe during the last 50 years.// J. Geophys. Res. – Atmospheres, 2008, vol. 113, doi:10.1029/2007JD008393.
21. Zolina O., Simmer C., Kapala A. and Gulev S.K. On the robustness of the estimates of centennial-scale variability in heavy precipitation from station data over Europe.// Geophys. Res. Lett., 2005, vol. 32, doi:10.1029/2005GL023231.

22. Zolina O., Kapala A., Simmer S. and Gulev S.K. Analysis of extreme precipitations over Europe from different reanalyses: a comparative assessment.// *Global and Planetary Change*, 2004, vol. 44, pp. 129-161.
23. Jung T., Hilmer M., Ruprecht E., Kleppuk S., Gulev S.K. and Zolina O. Characteristics of the resent eastward shift of interannual NAO variability.// *Journal of Climate*, 2003, vol. 16, pp. 3371-3382.
24. Zolina O. and Gulev S.K. Synoptic variability of ocean-atmosphere turbulent fluxes associated with atmospheric cyclones.// *Journal of Climate*, 2003, vol. 16, pp. 2717-2734.

Работы в издании из списка, рекомендованного ВАК, принятые к печати:

1. Sommer A., Barnier B., Zolina O., Gulev S.K. and Cosme E. Assessment of global ocean daily precipitation produced by atmospheric reanalyses in regard to satellite estimates.// *Journal of Climate*, 2018, в печати.