

на правах рукописи

Д. Васильев

Васильев Денис Юрьевич

**ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ЮЖНОМ УРАЛЕ:
ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ**

Специальность 1.6.18. – Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Научный консультант:

Семенов Владимир Анатольевич,
доктор физико-математических наук, академик РАН

Официальные оппоненты:

Гущина Дарья Юрьевна,
доктор географических наук, доцент, профессор кафедры метеорологии и климатологии Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Калинин Николай Александрович,
доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета

Шерстюков Борис Георгиевич,
доктор географических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией исследования последствий изменения климата ВНИИГМИ-МЦД, Росгидромета

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Защита состоится: «.....» 2023 г. в часов на заседании диссертационного совета 24.1.049.03 на базе ФГБУН Институт географии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ФГБУН Институт географии Российской академии наук и на сайте организации <http://igras.ru/defences>.

Автореферат разослан «.....» 2023 года.

Отзыв на автореферат (на бумажных носителях в двух экземплярах, заверенные подписью и печатью и в электронном виде в формате PDF) просим направлять по адресу 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29, ученому секретарю Диссертационного совета 24.1.049.03, Титковой Т.Б.

e-mail: d00204604@igras.ru

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат географических наук

Т.Б. Титкова



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Наблюдаемый с начала XX века рост глобальной приповерхностной температуры воздуха на Земле и в отдельных ее регионах (рис. 1), способствовал усилению интереса к проблеме изменения климата. Рост экстремальности климата и числа опасных погодных явлений (ОПЯ), прежде всего опасных гидрометеорологических явлений, наблюдаемых в различных регионах Земли с конца XX – начала XXI вв., еще больше способствовал повышению интереса к данному вопросу. К настоящему времени установлено, что изменение климата оказывает существенное влияние на динамику природных систем, жизнедеятельность человека и, связанную с ней, хозяйственную инфраструктуру.

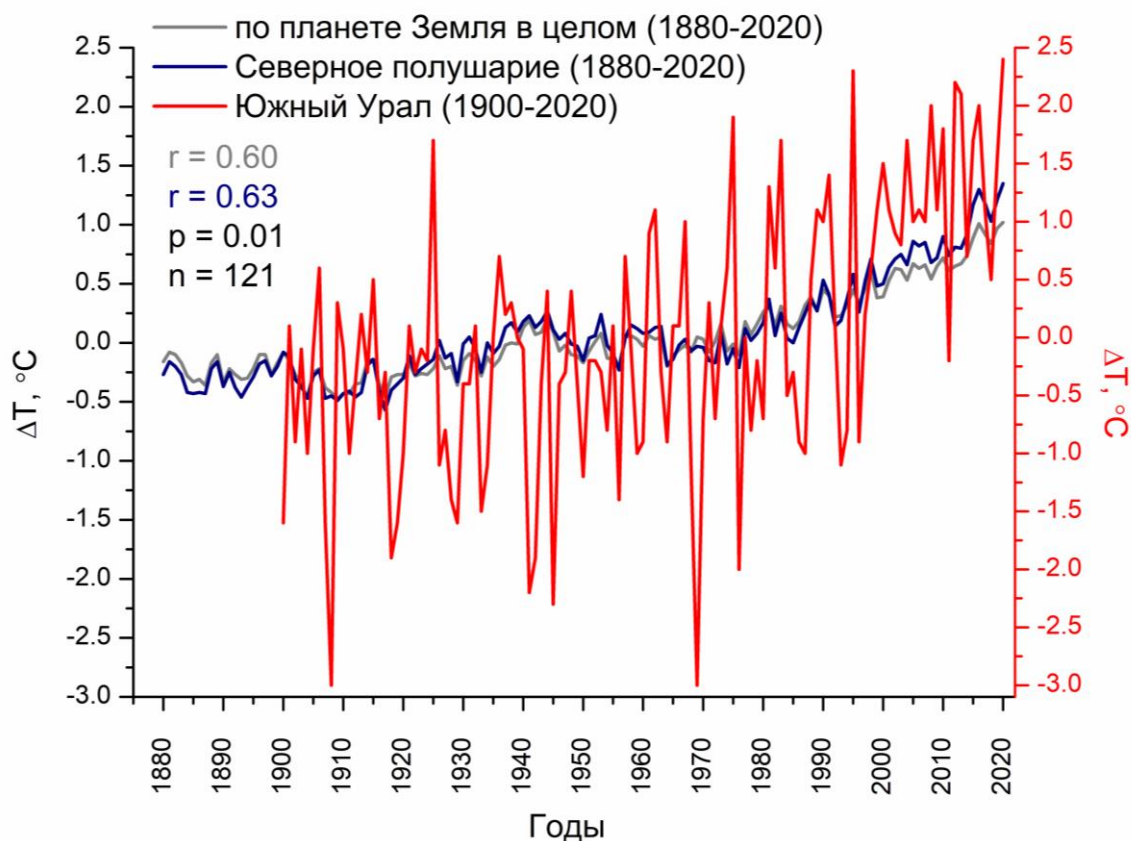


Рисунок 1. Средние годовые аномалии приповерхностной температуры воздуха. Температурные данные по планете Земля и по Северному полушарию взяты с сайта NASA. Аномалии температуры воздуха по Южному Уралу вычислены с использованием инструментальных данных наблюдательной сети Росгидромета

Согласно Шестому оценочному докладу МГЭИК, число ОПЯ на территории России за последние 10 лет не растет; последние десятилетия XX и начало XXI вв., между тем, были отмечены ростом числа ОПЯ и, связанного с этим, возрастанием масштабов экономического и гуманитарного ущерба. По оценкам Росгидромета, скорость роста ОПЯ в конце XX – начале XXI вв. на территории России составила около 200 случаев/10 лет, а ущерб от ОПЯ за это же время исчислялся в более 100 млрд. рублей. Учет гидрометеорологических факторов является, следовательно, необходимым условием для устойчивого функционирования хозяйственной инфраструктуры и социально-экономического развития как для Российской Федерации в целом, так и для отдельных ее субъектов. В соответствии с третьим оценочным докладом Росгидромета, проявления изменений климата на территории Российской Федерации характеризуются впечатляющим многообразием и неоднозначностью последствий для природной среды, экономики и населения нашей страны. Для России важен весь комплекс угроз, рисков и возможностей, обусловленных наблюдаемыми и ожидаемыми климатическими

изменениями, что вносит специфические особенности в политику РФ. Это обуславливает необходимость учёта изменений климата в качестве одного из ключевых долговременных факторов безопасности Российской Федерации и выдвигает проблему предсказуемости изменений климата и их последствий в её национальном и международном измерениях в число приоритетов политики Российской Федерации.

По результатам модельных оценок глобальных и региональных изменений климата (напр., Семенов и Алешина, 2021) установлено, что современная глобальная приповерхностная температура воздуха в последнее десятилетия монотонно росла и превышала соответствующие значения для предшествующих десятилетий. Такое глобальное потепление может привести к изменению гидрологического цикла и режима атмосферных осадков. В тоже время изменения температурных режимов отдельных регионов часто отличаются от изменений глобальной и полушарных приземной температуры. Поэтому исследования по изучению изменчивости гидрометеорологических параметров (приземной температуры воздуха, атмосферных осадков и речного стока) имеют, большое значение на региональном уровне, особенно для районов с разнообразными физико-географическими условиями, к которым, безусловно, относится территория Южного Урала, климат которого континентальный, где наиболее сильна внутренняя изменчивость климата.

Одной из главных проблем при получении достоверных оценок изменений климата и исследования их причин является относительная непродолжительность рядов инструментальных данных, полученных на большинстве гидрометеорологических станций с помощью метеорологических спутников, а также по данным реанализов. Действительно, период инструментальных наблюдений на территории России в среднем не превышает 100 лет, тогда как для оценки климатических изменений в масштабе 100 и более лет необходимо иметь более длительные ряды гидрометеорологических параметров. Известно, что в годичных слоях древесных растений содержится информация о климатических условиях прошлых столетий, поэтому проведение дендроклиматических (палеоклиматических реконструкций) исследований очень важно. Отметим, что научными коллективами в разных странах большая часть палеоклиматических реконструкций проведена для исследования изменчивости приземной температуры и атмосферных осадков. Затем по количеству исследований следуют реконструкции речного стока (например, работы Агафонова и Гурской (2020) и Meko et al. (2020)). Что касается аналогичных исследований для Южного Урала, то наибольшая связь годичного прироста деревьев выявлена здесь с атмосферными осадками весенне-летнего периода (Кучеров, 2010). В целом отметим, что возможность оценки прошлых изменений климата на основе палеореконовструкций для гораздо более длительного, по сравнению с периодом инструментальных наблюдений, временного интервала являются важным инструментом не только для понимания современных, но и для прогноза будущих изменений климата.

Таким образом, актуальность данного исследования связана, прежде всего, с растущими негативными последствиями изменения климата для экологических условий и экономики Южного Урала. Необходимость исследования изменения климата Южного Урала обусловлена также географическим положением региона, расположенным на стыке Европейской части России и Западной Сибири, что дает уникальную возможность исследования климатических предпосылок, связанных со смещением зон увлажнения под влиянием естественной климатической изменчивости в условиях глобального потепления.

Цель исследования

Установление и описание механизмов изменчивости гидрометеорологических параметров на различных пространственно-временных масштабах на Южном Урале в современный и исторический период, а также оценка влияния региональных климатических изменений на динамику и функционирование природных систем.

Задачи исследования:

1. Анализ пространственно-временной структуры изменчивости приповерхностной температуры воздуха на Южном Урале для выявления основных факторов, определяющих климатические изменения в регионе.
2. Анализ пространственно-временной структуры изменчивости атмосферных осадков на Южном Урале с целью определения основных факторов, влияющих на климатические изменения в регионе.
3. Пространственно-временной анализ речного стока на Южном Урале на примере бассейнов рек Белая и Урал.
4. Выявление возможных механизмов формирования естественной климатической изменчивости на Южном Урале на основе анализа данных глобальной модели общей циркуляции атмосферы.
5. Проведение дендрохронологических реконструкций для выявления климатических факторов, оказывающих лимитирующее влияние на радиальный прирост деревьев для некоторых районов Южного Урала.
6. Оценка условий увлажнения территории Южного Урала на основе индексов засухи.
7. Оценка метеорологических условий пожарной опасности и загрязнения атмосферного воздуха на Южном Урале.

Объект исследования – процессы изменения климата, гидрологического режима и загрязнения атмосферного воздуха на Южном Урале.

Предметом защиты является решение ***крупной научной проблемы*** – определение тенденций изменения температурного режима, атмосферных осадков на Южном Урале и водного режима рек Белая и Урал под влиянием глобальных изменений климата и выявление их возможных механизмов.

Используемые данные и методы исследования:

В работе использовались данные гидрометеорологических наблюдений Росгидромета, дистанционных измерений, климатического моделирования и атмосферных реанализов. Для оценки статистической связи между изучаемыми параметрами применялся корреляционный и регрессионный анализ. В анализе спектральной структуры гидрометеорологических параметров использовались методы Фурье и вейвлет преобразования. Для понимания возможных физических причин, лежащих в основе изменений во времени использованных гидрометеорологических параметров, был использован кросс-вейвлет анализ с климатическими индексами. При описании статистической структуры температурных полей и атмосферных осадков использовался метод главных компонент или разложение исследуемой векторной функции в ряд по системе ортогональных и нормированных функций.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Количественные оценки изменений многолетнего режима температуры воздуха, атмосферных осадков и речного стока для территории Южного Урала с использованием вейвлет анализа.
2. Определение временной локализации и количественные оценки вклада различных мод климатической изменчивости в колебания приповерхностной температуры воздуха, атмосферных осадков и речного стока на Южном Урале.
3. Установление связи радиального прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*) с основными гидрометеорологическими параметрами на основе 242-летней и 135-летней реконструкций атмосферных осадков весенне-летних месяцев для территории Южного Урала, с выявлением низкочастотных колебаний и их связи с климатическими индексами.
4. Выявление и описание пространственно-временной структуры изменчивости основных гидрометеорологических параметров Южного Урала, с выделением сезонов наибольшего

влияния индексов Североатлантического колебания и Атлантического мультидекадного колебания.

5. Пространственно-временные характеристики засушливости на основе вычисленных значений индексов засушливости и количественные оценки влияния долгопериодных колебаний климата на повторяемость засух для исследуемой территории Южного Урала.

6. Количественная оценка влияния изменения климата на распространение и интенсивность лесных пожаров для территории Южного Урала, с выявлением тесноты связи между экстремальными значениями индексов пожарной опасности и аномально жаркими годами.

7. Количественная оценка влияния климатических изменений на уровень загрязнения и качество атмосферного воздуха для самой крупной агломерации на территории Южного Урала, города Уфы, с анализом специфических синоптических условий, способствующих увеличению концентрации загрязняющих веществ в атмосфере города Уфы.

Научная новизна

1. Впервые получены количественные оценки вклада крупномасштабных мод естественной изменчивости климата в колебаниях атмосферных осадков и температурного режима на Южном Урале.

2. Впервые с помощью вейвлет и кросс-вейвлет анализа выявлены циклы в колебаниях речного стока и установлены причины различной реакции гидрологического режима бассейна рек Белая и Урал на колебания регионального климата.

3. На основе анализа эмпирических данных и результатов экспериментов с глобальной моделью общей циркуляции атмосферы ECHAM5 произведена оценка прямого радиационного воздействия (ПРВ) в изменения температуры на Южном Урале в последние десятилетия. Установлено, что вклад ПРВ с 1979 по 2012 гг. в регионе превышает 0,6 °C/годы и составляет 45% величины среднего по ансамблю, в котором концентрации CO₂ и CH₄ изменялась согласно инструментальным измерениям.

4. На основе выявленной тесной связи хронологии прироста сосны обыкновенной на Бугульминско-Белебеевской возвышенности с осадками мая-июня ($r=0,60$) впервые проведена реконструкция атмосферных осадков весенне-летнего сезона для периодов с 1860 по 1994 гг. и удлинение реконструкции атмосферных осадков мая-июля на Зилаирском плато ($r=0,78$) с 1776 по 2017 гг., соответственно.

5. Впервые на основе вейвлет и кросс-вейвлет анализа выявлены циклы в колебаниях атмосферных осадков весенне-летнего периода на Южном Урале, а также установлена связь этих циклов с различными модами естественной климатической изменчивости.

6. Впервые произведена количественная оценка влияния метеорологических условий на режим увлажнения, пожарную опасность и загрязнения атмосферного воздуха для территории Южного Урала.

Научная и практическая значимость:

1. Выявленные характерные периоды в колебаниях приповерхностной температуры воздуха, атмосферных осадков и речного стока способствовали лучшему пониманию динамики климата Южного Урала и могут быть использованы для разработки улучшенных методов прогноза.

2. Полученные для Южного Урала результаты кросс-вейвлет анализа гидрометеорологических параметров и разложения на естественно-ортогональные составляющие могут быть использованы для оценки качества климатических прогнозов на ближайшие десятилетия, а также для улучшения моделей климата.

3. Реализованная модель долгосрочного прогноза весеннего стока на примере реки Белой может быть использована в гидрологической практике Башкирского УГМС Росгидромета.

4. Полученные наборы древесно-кольцевых данных и построенные реконструкции атмосферных осадков могут быть использованы в проведении обобщающих

палеоклиматических исследований, как на Южном Урале, так и для всей Европейской части России.

5. Большинство используемых в диссертационной работе методов и вычислительных процедур было реализовано в программном пакете MatLab, с использованием языка программирования C++, и используются в курсах лекций и практических занятиях по дисциплине «Физико-географические основы природной среды» на факультете защиты в чрезвычайных ситуациях Уфимского университета науки и технологии.

6. Для территории Южного Урала создана уникальная база данных по индексам увлажнения и пожарной опасности.

Результаты, положенные в основу диссертационной работы, были получены в рамках следующих научных программ и проектов: государственных заданий рег. № 01201352488 и рег. № АААА-А21-121011190016-1, Президиума РАН, РФФИ (проект № 17-05-00561), РФФИ-РГО № 17-05-41085, РНФ (№19-17-00242), а также при поддержке соглашения № 075-15-2021-577 с Министерством науки и высшего образования РФ.

Личный вклад авторы

Все представленные результаты в диссертации, были получены автором либо лично, либо в соавторстве с российскими коллегами. Часть результатов по анализу пространственно-временной структуры приземной температуры воздуха получена в соавторстве с В.А. Семеновым. Основная часть исследований по палеоклиматическим реконструкциям проведена совместно с С.Е. Кучеровым. В работах, относящихся к выносимым на защиту результатам и выполненным в соавторстве, основная идея исследования принадлежала автору.

Апробация работы

По теме диссертации опубликовано 26 работ, из них 19 в журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК РФ: «Доклады Академии Наук», «Метеорология и Гидрология», «Известия РАН - серия Географическая», «География и Природные Ресурсы», «Экология», «Оптика Атмосферы и Океана», «Исследование Земли из Космоса», и др. Список основных публикаций приведен ниже.

Результаты исследования по диссертационной работе были представлены на следующих всероссийских и международных научных конференциях: международная конференция молодых ученых «Land-Ocean-Atmosphere Interactions in the Changing World» (2011 г.), открытая международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (2011, 2012, 2019, 2020, 2021 и 2022 гг.), САтЭП (2012), всероссийская научная конференция «Процессы самоорганизации в эрозионно-руслых системах и динамике речных долин (Fluvial systems-2012) с участием иностранных ученых», научно-практическая школа-семинар для молодых ученых и специалистов в области гидрометеорологии (2012 и 2013 гг.), МАПАтЭ - 2013, международная конференция, посвященной памяти академика А.М. Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» (2013 и 2018 гг.), САтЭП - 2014, международная конференция молодых ученых «Environmental observations, modeling and information systems - ENVIRROMIS» (2014), всероссийская научная конференция «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития» (2017), международная конференция «International geographical union thematic conference dedicated to the centennial of the institute of geography of the Russian academy of science» (2018), XXIV, XXV, XXVI, XXVII, XXVIII и XXIX Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (2018, 2019, 2020, 2021, 2022 и 2023 гг.), IX международный симпозиум «Степи Северной Евразии» (2021), всероссийская конференция «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования». Также доклады проводились на заседаниях отделов гидрологии и метеорологии Башкирского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), физического отдела Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, научном семинаре лабораторий климатологии

и гидрологии Института географии РАН, ученом совете Института степи УрО РАН, кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Казанского федерального университета, кафедры физической географии и гидрологии суши географического факультета Башкирского государственного университета, кафедры физики Башкирского государственного аграрного университета.

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы – 367 наименование. В ней содержатся 285 страниц текста, 22 таблицы, 84 рисунка.

Автор выражает глубокую благодарность научному консультанту, доктору физико-математических наук, академику РАН Владимиру Анатольевичу Семенову за постоянную помощь при выполнении данного исследования. Также автор считает своим долгом выразить глубокую признательность доктору географических наук, академику РАН, профессору А.А. Чибилеву, доктору физико-математических наук, профессору А.Н. Чувыврову и доктору биологических наук С.Е. Кучерову, с которыми проводились совместные исследования.

Автор также искренне признателен руководству и сотрудникам Башкирского управления и Оренбургского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета – Ю.И. Ферапонтову, В.З. Горохольской, В.А. Мещерину, Н.А. Бондаренко, М.С. Утесеновой и Г.Н. Семеновой за предоставленные материалы и многолетнюю совместную работу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** кратко дается состояние проблемы, обоснована актуальность темы, поставлены цели и задачи работы, перечислены методы исследования, обосновывается новизна и практическая значимость работы, приводятся результаты апробации и личный вклад автора в получение результатов. Кроме того, формулируются положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** приводится физико-географическое описание территории Южного Урала, включающая в себя Башкирию и Оренбургскую область (рис. 2). Также в этой главе подробно описываются используемые в работе массивы данных, которые можно разбить на несколько основных групп: 1) инструментальные данные с гидрометеорологических постов и станций сети Росгидромета; 2) данные дистанционных измерений (спутниковые наблюдения, а также показания метеорологического температурного профилимера); 3) данные реанализов, климатических индексов; 4) данные численных экспериментов с глобальной климатической моделью ECHAM5.

Данные инструментальных измерений были взяты с 20 метеорологических станций и 15 гидрологических постов, расположенных на территории Южного Урала, а также с 9 станций регулярной наблюдательной сети за состоянием атмосферного воздуха в городе Уфе. Используемые данные дистанционных измерений представлены массивом данных регулярных измерений профилей температуры в нижнем 1000-метровом слое прибором МТП-5 и спутниковыми наблюдениями Terra-MODIS за состоянием окружающей среды и изменением климата. Наборы данных повторного анализа представлены тремя реанализами: ECMWF-ERA, NOAA-CIRES, CRU-TS.

Основными климатическими индексами, используемыми в работе, были индекс Североатлантического колебания (САК) и индекс Атлантического мультидекадного колебания (АМК). Также использовались два ансамбля численных экспериментов, по 30 сценариев в каждом, с моделью общей циркуляции атмосферы (МОЦА) ECHAM5. В каждом численном эксперименте модели задавались поля температуры поверхности океана (ТПО) и концентрация морского льда (КМЛ) по данным объективного анализа наблюдений HadISST1.1 Центра Гадля за период 1979-2012 гг. Таким образом, было реализовано 60 экспериментов с идентичными граничными и различными начальными условиями (состояние атмосферы на 1 января 1979 г.). В первых 30 экспериментах концентрации парниковых газов в модели принимались

постоянными и примерно соответствовали уровню 1980-х годов (концентрация CO_2 была 348 ppm, а CH_4 составляла 1,64 ppm), в остальных 30 экспериментах концентрация парниковых газов менялась согласно инструментальным наблюдениям.

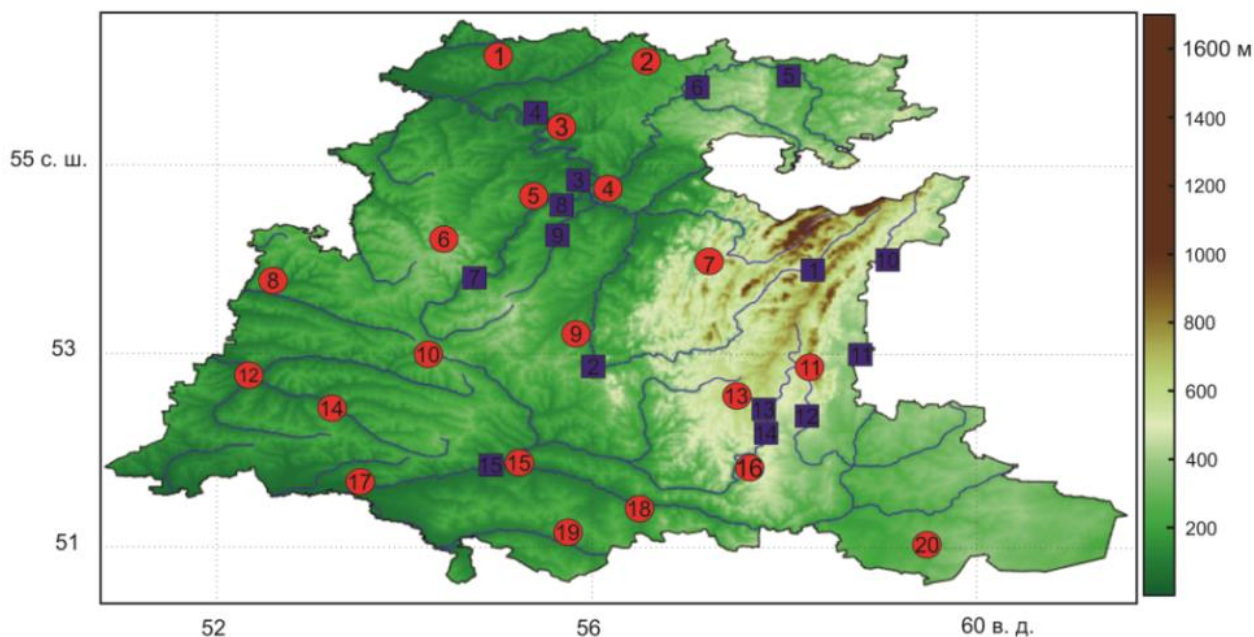


Рисунок 2. Территория Южного Урала и используемая сеть гидрометеорологических станций Росгидромета. Красными точками обозначены метеорологические станции, синими квадратами гидрологические посты. Топографическая карта и гидрографическая сеть выполнены в программе MatLab2014R, с использованием пространственных данных ETOPO1

В **Главе 2** приводятся результаты анализа климатической изменчивости стационарных данных основных гидрометеорологических характеристик (приповерхностная температура воздуха, атмосферные осадки и речной сток). Количественная оценка параметров цикличности производилась с использованием аппарата непрерывных вейвлет преобразований на основе вейвлет функций МНАТ и MORLE. Затем ряды данных атмосферных осадков, температуры воздуха и речного стока проверялись на наличие связи с основными климатическими индексами. Оценка степени тесноты такой связи производилась с помощью кросс-вейвлет преобразования (КВП).

Результаты проведенного спектрального анализа гидрометеорологических характеристик по стационарным наблюдениям с продолжительностью от 85 до 120 лет позволили установить наличие квазипериодичностей во временных рядах (рис. 3), связанных с межгодовыми, междекадными и мультидекадными колебаниями. Вейвлет-анализ выявил цикличности в колебаниях температуры, осадков и речного стока, которые в работе были условно разделены на высокочастотные с периодами от 2,3 до 7,1 лет и низкочастотные от 11,2 до 50-60 лет. Последние, самые продолжительные циклы, оказались статистически значимы только в температурных рядах по пяти МС, а именно г. Оренбург, г. Бугуруслан, г. Бирск, г. Уфа и пос. Чишмы, интервал наблюдений по которым превышал 100 лет. На локальных спектрах (рис. 3, левые панели) черные линии ограничивают области с мощностью сигнала, превышающей мощность модельного стационарного красного шума на уровне 95%, а пунктирная линия ограничивает область краевых эффектов (конус влияния). Пунктирные линии на интегральных спектрах (рис. 3, правые панели) показывают границы доверительного интервала ($p = 0,05$). Отметим, что, согласно локальным вейвлет-спектрам высокочастотные межгодовые колебания температуры для периода 2,7 года с непродолжительными разрывами были установлены практически везде с 1886 по 2014 гг., а колебания с периодом 4,1 года определены для 1900-1916 гг., 1920-1952 гг., 1958-1978 гг., 1990-1998 гг. и 2011-2014 гг.

Низкочастотные составляющие с периодом 11,2 лет наблюдались на интервалах: 1886-1946 гг. и 1973-1995 гг. Периоды в 22,2 и 50-60 лет локализовались во временных интервалах 1866-1937 гг. и 1964-2015 гг., но оказались статистически незначимыми в силу короткости ряда наблюдений по отношению к длине выявленных периодов.

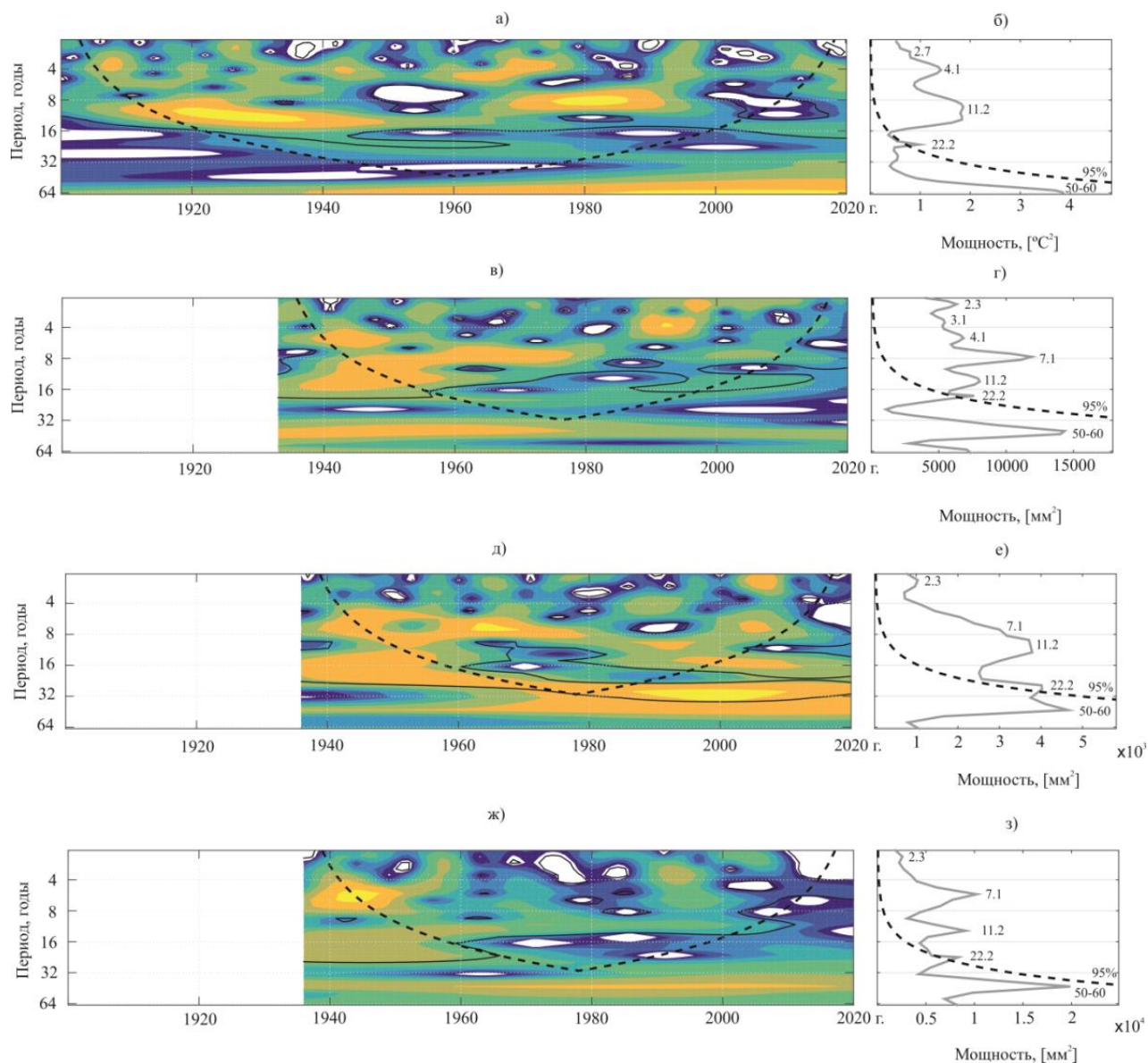


Рисунок 3. Вейвлет анализ: а) и б) приповерхностной температуры воздуха на Южном Урале; в) и г) атмосферных осадков на Южном Урале; д) и е) речного стока на ГП р. Белая – г. Бирск; ж) и з) речного стока на ГП р. Урал – г. Оренбург.

В данных наблюдений за атмосферными осадками, так же как и в температурных рядах, были выявлены высокочастотные колебания с периодами от 2,7 до 3,2 и 7,1 года и низкочастотные составляющие – с периодами в 11,2 и 22,1 лет. Последние были обнаружены на интервалах 1937-1958 гг., 1966-1988 гг. и 1989-2011 гг. Колебания с периодами 2,7-3,2 года отмечены на интервалах: 1936-1947 гг., 1950-1978 гг. и 1982-2015 гг. Осцилляции в 7,1 года найдены на интервалах: 1936-1958 гг., 1966-1988 гг., 1989-2011 гг.

Согласно рассчитанным в работе локальным вейвлет-спектрам, высокочастотные межгодовые колебания в данных речного стока (2,3, 5,5-7,2 года) были определены для временных интервалов 1920-1926, 1939-1941, 1957-1958, 1965-1966, 1992-2005 гг., что совпадает с датами наиболее сильных наводнений, зарегистрированных в городе Оренбурге (1922, 1942, 1957, 1993, 2000 и 2005 гг.) и в городе Уфе (1979, 1990, 1991, 1994, 1997, 2001 гг.).

Статистически значимые среднечастотные вариации стока (периоды от 11,2 до 22,1 года) установлены для всех ГП практически со времени начала наблюдений до настоящего времени с небольшими перерывами, что соответствует установленной высокой корреляции между солнечной активностью и температурным режимом тропосферы. Самые низкочастотные статистически значимые колебания стока с периодом в 35-40 лет проявились почти на всех ГП на всем интервале наблюдений.

КВП-анализ, проведенный в диссертационной работе, показал тесную связь приповерхностной температурой воздуха с основными климатическими индексами. Были определены несколько статистически значимых когерентностей как для высокочастотных, так и для низкочастотных вариаций. Высокая степень связи была установлена с индексом САК в высокочастотной области в отдельные непродолжительные временные интервалы, соответствующий пикам активности ЮК (1982-1983 гг., 1997-1998 гг., 2002-2003 гг., 2006-2007 гг. и 2009-2010 гг.) и носящий или противофазный характер, либо с отставанием фазы колебания на $\pi/2$. В низкочастотном диапазоне с периодами от 11 до 35 лет степень связи была высокой, а тип когерентности синфазный. При КВП-анализе индекса АМК с температурными рядами так же была установлена высокая степень связи с четкой временной локализацией, когда высокочастотные, преимущественно синфазные, колебания проявились в интервале до 1950-х, а низкочастотные после 1950-х годов.

Аналогичный КВП-анализ основных климатических индексов с данными наблюдений за атмосферными осадками установил, что когерентность осадков с первыми двумя климатическими индексами (САК и АМК) оказалось более слабой и менее отчетливой. Действительно, колебания индекса САК и атмосферных осадков с периодом 7-11 лет носили несогласованный характер для большинства периодов наблюдений и только для наблюдений с начала 40-х по конец 60-х годов установлена противофазная, а с 70-х до конца XX века синфазная связь. Анализ на основе КВП индекса АМК с осадками в области низких частот практически не выявил статистически значимых когерентностей, в то время как когерентность с высокочастотными колебаниями носила противофазный характер на протяжении 50-х годов, а также для временных интервалов 1996-1998 гг. и 2006-2007 гг.

Проведенный КВП-анализ колебаний стока с климатическим индексом АМК не показал сколько-нибудь длительную по времени корреляцию. При этом, однако, в работе были определены несколько статистически значимых когерентностей для высокочастотных колебаний и установлена одна когерентность для среднечастотных вариаций стока с АМК в разные годы, каждый с периодом около 5 лет. Для характеристичных для АМК долгопериодных колебаний значимых когерентностей с колебаниями стока в работе не найдено.

В **Главе 3** производится реконструкция палеоклиматических условий на Южном Урале на Бугульминско-Белебеевской возвышенности и в центральной части Зилаирского плато, расположенных в континентальном климате. Лесная растительность в центральной части Зилаирского плато представлена лиственнично-сосновыми (*Larix sukaczewii* Dyl., *Pinus sylvestris* L.) лесами с вкраплениями широколиственных, преимущественно дубовых (*Quercus robur* L.), лесов. В работе были рассмотрены образцы древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), взятые с трех участков, (Z1, Z2, SR): Z1 (52°13,2'с.ш., 57°26,3'в. д., 460-490 м над уровнем моря) и Z2 (52°13,7'с.ш., 57°25,4'в.д., 470-480 м над уровнем моря), расположенных в среднем течении р. Зилаир на окраине с. Зилаир; участок SR (52°20'с.ш., 57°12-14'в.д., 510-520 м над уровнем моря) расположен в верхнем течении р. Большая Сурень. Образцы брали из нижней части стволов на минимально возможной высоте (20-40 см) от уровня земли с помощью возрастного бурава. У образцов измеряли ширину годичных колец (ШГК) и ширину зоны поздней древесины (ШПД). Датировка годичных слоев в образцах осуществлялась визуально перед проведением измерений по реперным годичным слоям. Всего в анализ были включены данные по результатам измерений у 53 деревьев с участка SR, 33 деревьев с участка Z1 и 15 деревьев с участка Z2. Инструментальные данные (суммы средних месячных осадков за 1933-2012 гг. и средние месячные температуры за 1936-2012 гг.) были взяты по данным

метеостанции Зилаир, расположенной в 20 км к юго-востоку от участка SR, и в 1,5–2 км от участков Z1 и Z2. Стандартизация рядов прироста деревьев проводилась относительно трендов прироста в рамках программы ARSTAN. Возрастные кривые вычисляли с использованием кубических сплайнов или по алгоритму Friedman Super Smoother (Friedman, 1984). Для каждой площади были построены хронологии по общей ШГК и ШПД. Начальные годы в хронологиях, соответствующие начальным годам в реконструкции осадков, определялись на основе статистики EPS (expressed population signal), значение которой показывает в какой степени реальная хронология отражает гипотетическую хронологию, представленную бесконечным количеством деревьев. Поскольку обычно хронология считается представительной только при значениях $EPS \geq 0,85$, то начальные участки хронологий с $EPS < 0,85$ при проведении реконструкции климатических параметров были исключены в работе. Реконструкция климатических переменных проводилась с использованием линейного регрессионного анализа, в котором независимой переменной являлся параметр радиального прироста, а зависимой - климатическая переменная, с которой выявлена максимальная корреляционная связь параметра радиального прироста. Статистическая достоверность регрессионных моделей была исследована с помощью тестов калибровки-верификации. Хронологии были построены по всем используемым в исследовании деревьям. Сходство между хронологиями трех площадей, установленных в работе, оказалось достаточно высокой. Коэффициент корреляции между хронологиями площадей на временном интервале 1788–2013 гг. для ШГК хронологий варьировался от 0,70 до 0,84, а для ШПД хронологий от 0,59 до 0,76. Это дало основание построить ШГК и ШПД хронологии, объединяющие деревья трех площадок, у которых начальные участки были представлены большим количеством деревьев, чем у хронологий отдельных площадей. Протяженность объединенных хронологий (рис. 4) составила 255 лет (1763–2017 гг.). У полученной SR+Z1+Z2 LW хронологии значению $EPS \geq 0,85$ соответствует участок, представленный 5 и более деревьями, поэтому начальный участок хронологии (1763–1775 гг.), представленный меньшим количеством деревьев и, соответственно низким значением EPS, не рассматривался в работе.

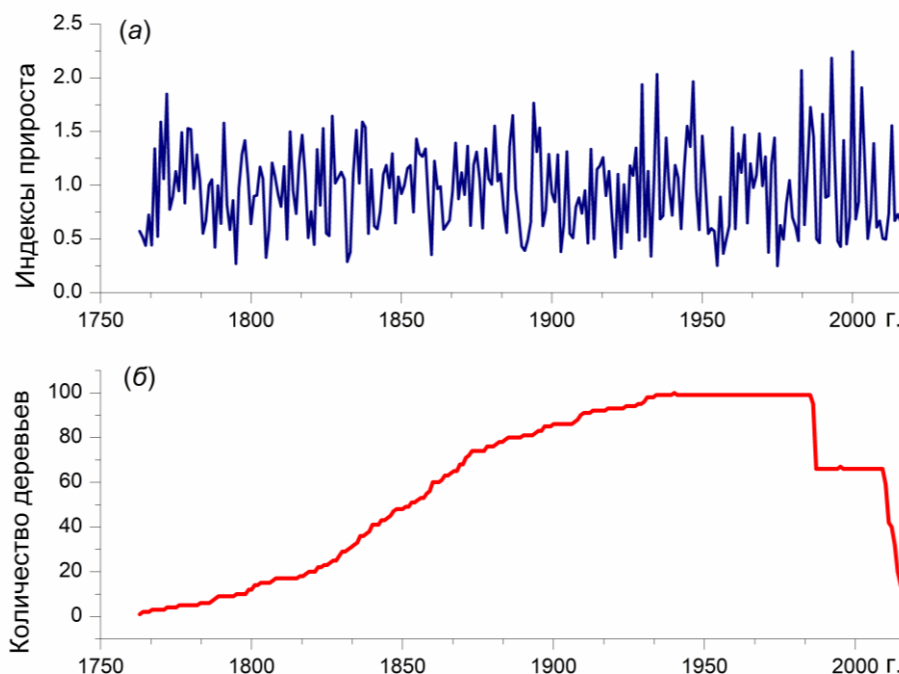


Рисунок 4. а) SR+Z1,2 хронология индексов ширины поздней древесины сосны обыкновенной и б) количество деревьев.

Достоверная (на уровне 0,05) положительная корреляционная связь как ШГК, так и ШПД хронологий найдена с осадками мая, июня и июля текущего года на обеих половинах

интервала метеонаблюдений (рис. 5), причем эта связь оказалась сильнее выражена у ШПД хронологии. Максимальная связь ШПД хронологии выявлена с суммой осадков мая–июля ($r=0,78$). Что касается температуры вегетационного периода текущего года, то достоверные значения коэффициента корреляции на обеих половинах периода метеонаблюдений получены для мая, июня и июля в случае ШПД хронологии и только для мая и июня для ШГК хронологии, которые к тому же были установлены противоположного знака по сравнению с осадками. Последнее связано с тем, что в районе исследования температура летних месяцев менялась асинхронно с количеством осадков (коэффициент асинхронности для мая, июня и июля равен 84, 70 и 67%, соответственно). То есть, годы с меньшим количеством летних осадков характеризовались более высокими значениями летней температуры. В такие годы деревья испытывают дефицит в почвенной влаге, как за счет меньшего количества атмосферных осадков, так и из-за того, что эта влага сильнее испаряется вследствие более высоких температур. Теснота связи ШПД и ШГК с речным стоком оказалась слабой. На основе выявленной сильной корреляционной связи ШПД хронологии сосны с осадками мая, июня и июля текущего года была построена регрессионная модель путем калибровки количества суммы осадков мая, июня и июля по хронологии табл. 1.

Таблица. 1. Результаты калибровки и верификации модели.

Интервал калибровки	1933-1972 гг.	1973-2012 гг.
Интервал верификации	1933-2012 гг.	1933-2012 гг.
Калибровка		
R_{adj}^2	0,60 ($p<0,001$)	0,61 ($p=0,001$)
Верификация		
r	0,79 ($p<0,001$)	0,78 ($p<0,001$)
RE	0,58	0,58
Тест знаков на интервалах верификации	-8	-7

Сходство между реальными и вычисленными по этому уравнению осадками установлено достаточно высоким (рис. 6). Коэффициент корреляции между реальными и вычисленными осадками мая–июля на интервале 1933–2012 гг. вычислен как 0,78, а синхронности как 87 %. Стандартное отклонение реальных осадков определено в 1,5 раза больше расчетных. Установлено, что после сглаживания рядов осадков 10-летним сплайном различие между сглаженными реальным и вычисленным количеством осадков несколько уменьшается – значение коэффициента корреляции повышается с 0,78 до 0,81, а отношение стандартных отклонений снижается с 1,5 до 1,35.

На основе полученной регрессионной модели, связывающей осадки мая–июля с приростом LW, была проведена реконструкция осадков мая–июля с 1776 г. (рис. 6). Всего в проведенной 240-летней реконструкции за период с 1776 по 2015 гг. присутствовали 46 летних периодов, в которых май–июль был засушливым, и 37 летних периодов, в которых май–июль был влажным. Все годы в реконструкции с экстремально влажным маем–июлем приходились на XX и начало XXI столетий. Использование данных реанализа и стационарных измерений позволило рассмотреть пространственную корреляцию реконструированных атмосферных осадков с фактическими наблюдениями (рис. 7). В реконструкции хорошо отражены засухи периода метеонаблюдений и засухи, сведения о которых имеются в архивных материалах и публикациях.

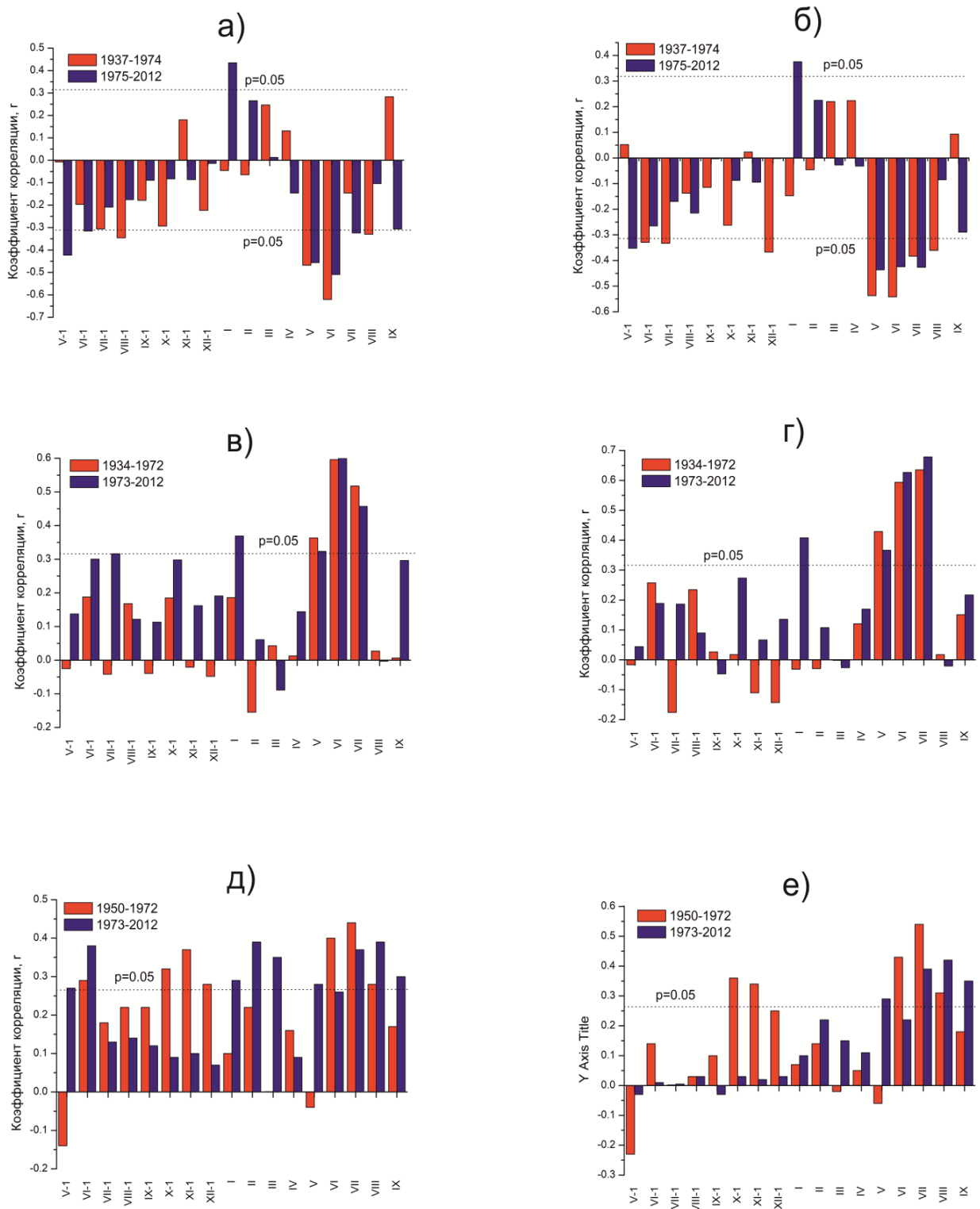


Рисунок 5. Коэффициенты корреляции Z1,2+SR хронологий с температурой воздуха: а) – для ШГК, б) – для ШПД; с количеством атмосферных осадков: в) – для ШГК, г) – для ШПД; с речным стоком: д) – для ШГК, е) – для ШПД. Нумерация месяцев произведена слева направо, начиная с мая предшествующего анализа прироста года.

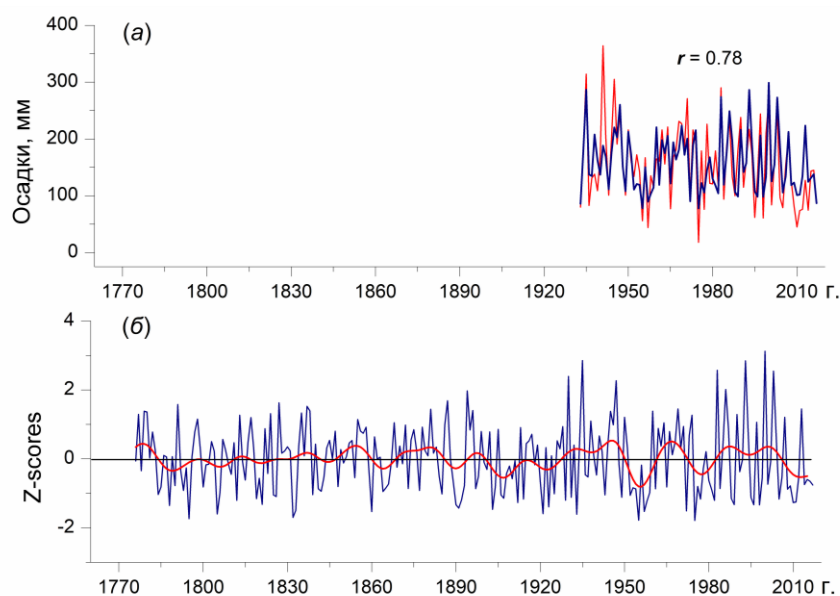


Рисунок 6. а) инструментальные значения атмосферных осадков по МС Зилаир (синяя линия) и реконструированное количество атмосферных осадков мая-июля (красная линия); б) отклонение реконструированного количества атмосферных осадков от среднего арифметического в единицах стандартного отклонения (синяя линия) и кривая их сглаживания десятилетним сплайном (красная линия).

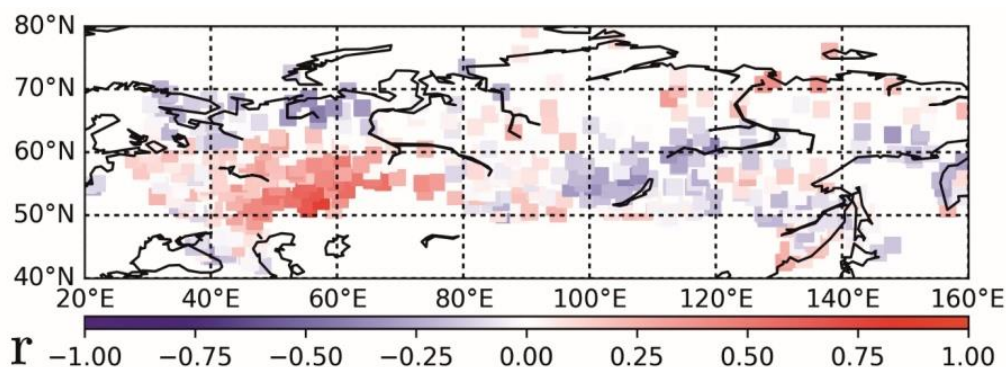


Рисунок 7. Пространственное распределение значений коэффициента корреляции r : реконструкция атмосферных осадков на Зилаирском плато с атмосферными осадками станционных измерений сети Росгидромета.

Вейвлет анализ позволил выявить в рядах осадков несколько характеристичных циклов, различающихся по продолжительности и частоте проявления. Проведенный кросс-вейвлет анализ установил, что связь реконструированных осадков с климатическими индексами САК и АМК оказалась более тесной по сравнению с солнечной активностью (Sunspot Number/SSN). Кроме того, благодаря большой длительности данных для реконструированных осадков, статистически значимыми оказались циклы в 22 года (САК, синфазная когерентность) и 50 лет для САК (опережающая когерентность) и АМК (запаздывающая когерентность).

В Главе 4 обсуждаются результаты исследования пространственно-временной структуры изменчивости приповерхностной температуры воздуха на Южном Урале и ее связь с крупномасштабной атмосферной циркуляцией. Одним из главных результатов было выделение характерной пространственно-временной структуры температурных аномалий, связанной с долгопериодными колебаниями климата Северного полушария. Кроме того, для каждого сезона были вычислены аномалии приповерхностной температуры воздуха по данным станционных измерений на Южном Урале (рис. 8). По этим данным установлен рост приповерхностной температуры воздуха, начиная с середины 70-х гг. XX века по настоящее время. Пространственные моды изменчивости выделялись с помощью разложения на естественные ортогональные составляющие (ЕОС).

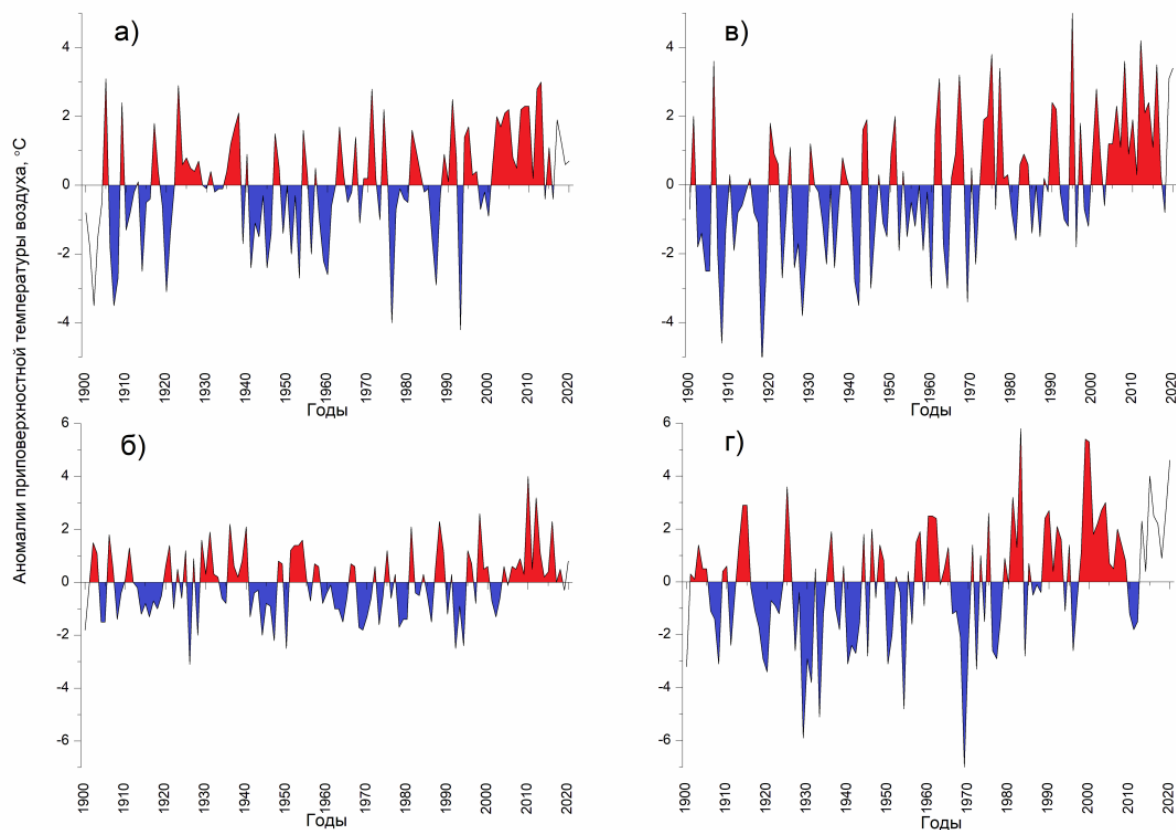


Рисунок 8. Аномалии приповерхностной температуры воздуха на Южном Урале по инструментальным измерениям сети Росгидромет: а) осень, б) лето, в) весна, г) зима.

Карты ЕОС, имеющие три наибольших собственных числа (СЧ) по расчетам за 1925-2020 гг., показаны на рис. 9. Результаты расчетов ЕОС1-3 (ЕОС4-12 так же были вычислены), СЧ которых очень малы, представлены в табл. 2. ЕОС с такими малыми значениями СЧ трудно подвергаются интерпретации и, как правило, не имеют физического смысла. Были рассчитаны не непрерывные в географическом пространстве поля, а 12-мерные собственные векторы ковариационной матрицы средней месячной температуры атмосферного воздуха относительно их норм за 96-летний интервал инструментальных наблюдений. Показанное пространственное распределение было построено путем интерполяции полигонных значений векторов на регулярную сетку на основе метода Винера-Колмогорова, известного так же под названием кригинга, который учитывает пространственную корреляцию данных и производит оценку точности полученной пространственной модели. Найдено, что ЕОС1 летнего и зимнего сезонов представляет собой аномалии противоположных знаков, имеющих дипольную структуру в направлении север-юг, при этом на юге для холодного сезона характерна отрицательная аномалия, распространение которой может быть обусловлено влиянием холодных Среднеазиатских воздушных масс. Установлено, что ЕОС2 зимнего сезона представляет собой триполь, с положительным очагом в центре и двумя отрицательными очагами на северо-западе и юго-востоке исследуемой территории. В летний сезон ЕОС2 представляет собой обширный экстремум положительных аномалий температуры и меньшей по площади аномалии отрицательного знака, что было объяснено в работе доминирующими направлениями перемещения воздушных масс в регионе. У ЕОС3 летних месяцев экстремумы аномалий температуры (отрицательные) находятся на северо-востоке Южного Урала вперемежку с незначительными по площади положительными аномалиями на юго-западе и юго-востоке. Для ЕОС3 зимних месяцев определен характерный отрицательный очаг температурной аномалии на

юго-востоке региона, ориентация которого совпадает с распространением отрога Сибирского (Азиатский максимум) антициклона.

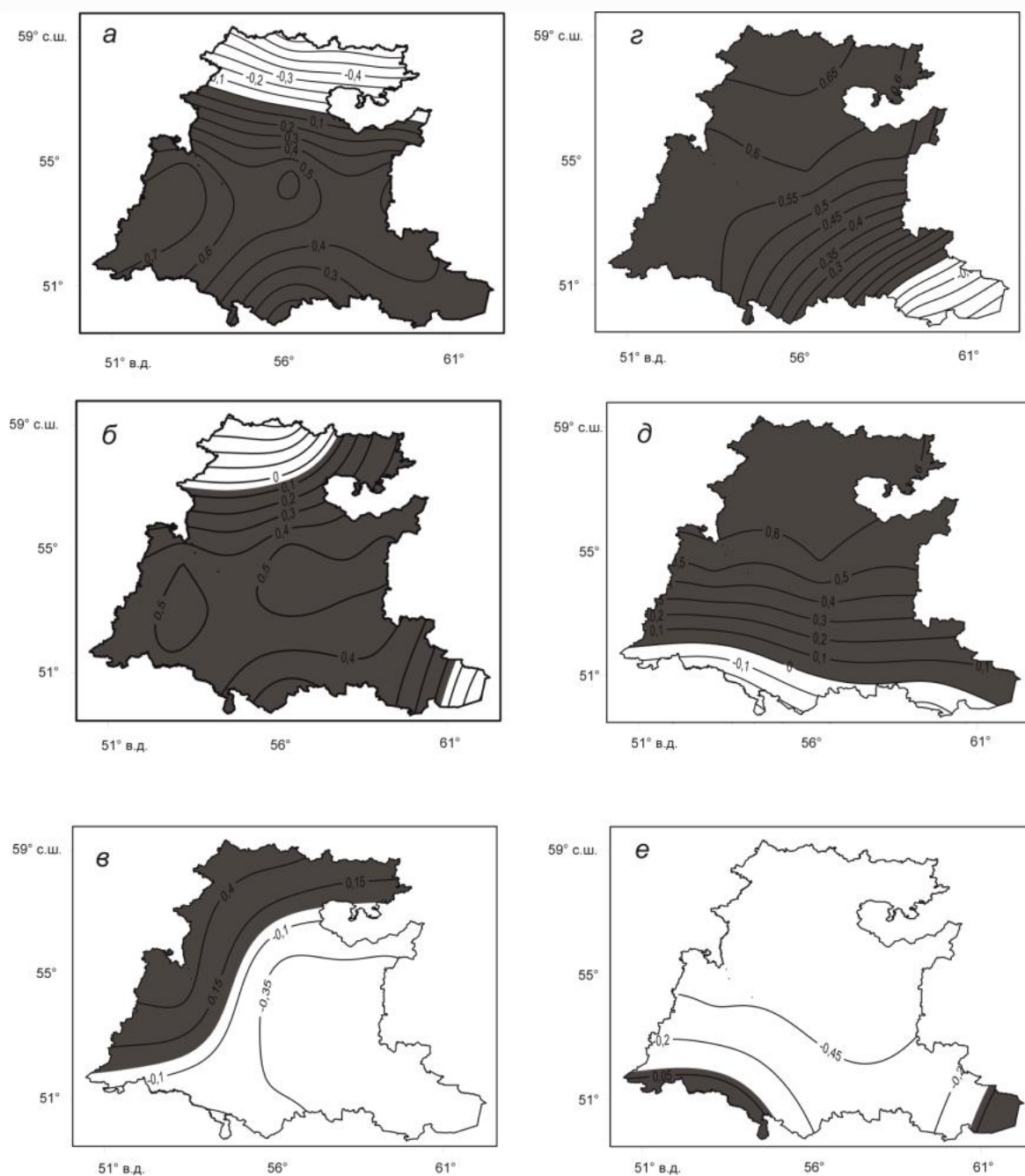


Рисунок 9. Карты EOC1-3, описывающих гладкие по пространству вариации полей средней месячной приповерхностной температуры воздуха над территорией Южного Урала. а) EOC1, б) EOC2, в) EOC3 для летнего сезона и г) EOC1, д) EOC2, е) EOC3 для зимнего сезона.

Для выявления связи EOC средней месячной температуры с основными модами изменчивости климата (AMK, САК, АО, РЕ, EAWR, SCAND, PNA, SOI, PDO, Sea Ice Index Anomaly) в работе был проведен корреляционный анализ. В результате было установлено, что наиболее тесная связь EOC1 яркостной температуры зимнего сезона найдена с индексами САК (коэффициент корреляции 0,63), АО (0,46), SOI (0,35), а для летнего периода с индексами AMK (0,73), EAWR (-0,47), SOI (-0,46) и SeaIceIndexAnomaly (0,51). Для остальных EOC по сезонам связь с климатическими индексами оказалась слабой и статистически незначимой. Ведущая компонента изменчивости приповерхностной температуры EOC1 для зимнего периода связана с САК (и с тесно коррелированным с ним АО) и SOI. Для летнего периода корреляционный

анализ выявил статистически значимые корреляции EOC1 с AMK, САК, EAWR, SOI и Sea Ice Index Anomaly. В работе показано, что летняя EOC1 объясняет подавляющую часть общей изменчивости температурных аномалий (82%). Первая связь свидетельствует о значительном влиянии долгопериодных колебаний температуры поверхности океана в Северной Атлантике на региональный климат. EOC1 для зимнего периода, полученные в результате анализа средней месячной температуры, описывают от 38% (в декабре) до 42% (в феврале) ее общей изменчивости. При этом усредненные по исследуемой территории многолетние колебания температуры также в среднем на 40% описываются EOC1.

Таблица 2. Значения собственных чисел ковариационных матриц аномалий приповерхностной температуры в тропосфере по сезонам и доли EOC1-12 в дисперсии разложения.

Зима (XII-II)			Лето (VI-VIII)		
Собственное число (СЧ)	Дисперсия	Суммарная дисперсия	Собственное число (СЧ)	Дисперсия	Суммарная дисперсия
22,56	81,77	81,77	11,68	88,28	88,28
4,74	4,78	95,22	0,99	7,45	92,55
2,84	1,99	98,01	0,27	2,01	97,99
1,09	0,85	99,15	0,09	0,72	99,28
0,99	0,48	99,52	0,07	0,50	99,50
0,31	0,26	99,74	0,05	0,30	99,70
0,28	0,18	99,82	0,04	0,20	99,80
0,20	0,15	99,85	0,03	0,16	99,84
0,17	0,12	99,88	0,02	0,13	99,87
0,07	0,10	99,90	0,01	0,11	99,89
0,05	0,08	99,92	0,01	0,09	99,91
0,03	0,00	100	0,01	0,00	100

Корреляционный анализ EOC2 зимних месяцев (с долей изменчивости 5%) не выявил какой-либо связи ни с одним из представленных климатических индексов. Временная динамика EOC3 зимней температуры по региону в целом, описывающая около 2% общей изменчивости, найдена слабо отрицательно коррелирующей с изменчивостью САК и АО с коэффициентами корреляции -0,41 и -0,28, а также слабо положительно с индексом SCAND ($r = 0,27$). В летний период, к которому по режиму атмосферной циркуляции относят период с июня по август, EOC1, полученные в результате анализа средней для лета и за каждый месяц в отдельности, температуры нижней тропосферы описывают 88% ее общей изменчивости на территории Южного Урала. EOC1 по отдельным месяцам составили для июня 85%, для июля 96%, для августа 90% от общей дисперсии. В целом в работе установлено, что EOC1 хорошо передает колебания средней по территории температуры в летний период с коэффициентом корреляции 0,75. Корреляционный анализ выявил тесную связь EOC1 для летнего сезона с двумя модами изменчивости: AMK ($r = 0,63$) и Sea Ice Index Anomaly ($r = 0,51$). Теснота связи колебаний EOC2 ($\approx 8\%$ общей изменчивости) с климатическими индексами (коэффициенты корреляции 0,35, -0,22, -0,5 и 0,33) является статистически значимой. Корреляционный анализ EOC3 (2% общей дисперсии) с климатическими модами не выявил никакой статистически значимой связи. Для того чтобы оценить вклад изменчивости, связанный с выявленными аномалиями, в EOC, из осредненных по исследуемому региону температурных вариаций, были вычтены аномалии температуры, как связанные с EOC1-3 по отдельности, так и с суммой отдельных EOC1,2,3. Остаточные аномалии в сравнении с исходными данными представлены на рис. 10(a-в) для зимнего и на рис.10(г-е) для летнего периодов.

В результате установлено, что в зимний период на долю EOC1 и EOC3 приходится 84% общей температурной изменчивости, а EOC2 не вносит существенного вклада, что видно из рис. 10(б). Показано также, что вклад EOC1 (рис.10(a)) является доминирующим на всем интервале наблюдений и показывает положительный тренд. Удаление аномалий

среднемесячной температуры воздуха, связанных с ЕОС1, ЕОС2 и ЕОС3, приводит к полному исчезновению междекадной (внутривековой) изменчивости, практически нивелирует температурные флуктуации и, как следствие, способствует исчезновению тренда. В летний период на долю первых двух ЕОС также приходится больший вклад, тогда как влияние ЕОС3 является незначительным. Поэтому удаление первых трех ЕОС приводит к невозможности оценки тренда в колебаниях приземной температуры воздуха.

Выявление причин изменения климата Южного Урала было основано в работе на сравнении наблюдаемых изменений с ожидаемой реакцией на предполагаемые внешние воздействия, полученных с помощью выверенных климатических моделей. Для оценки тенденций в изменении приземной температуры Южного Урала были вычислены линейные тренды в инструментальных и модельных данных по двум ансамблям с 30 сценариями в каждом, зимнего и летнего сезонов. Также вычислены, линейны тренды по среднеансамблевым значениям температуры воздуха и сравнены с инструментальными данными приземной метеорологии (Рис. 11).

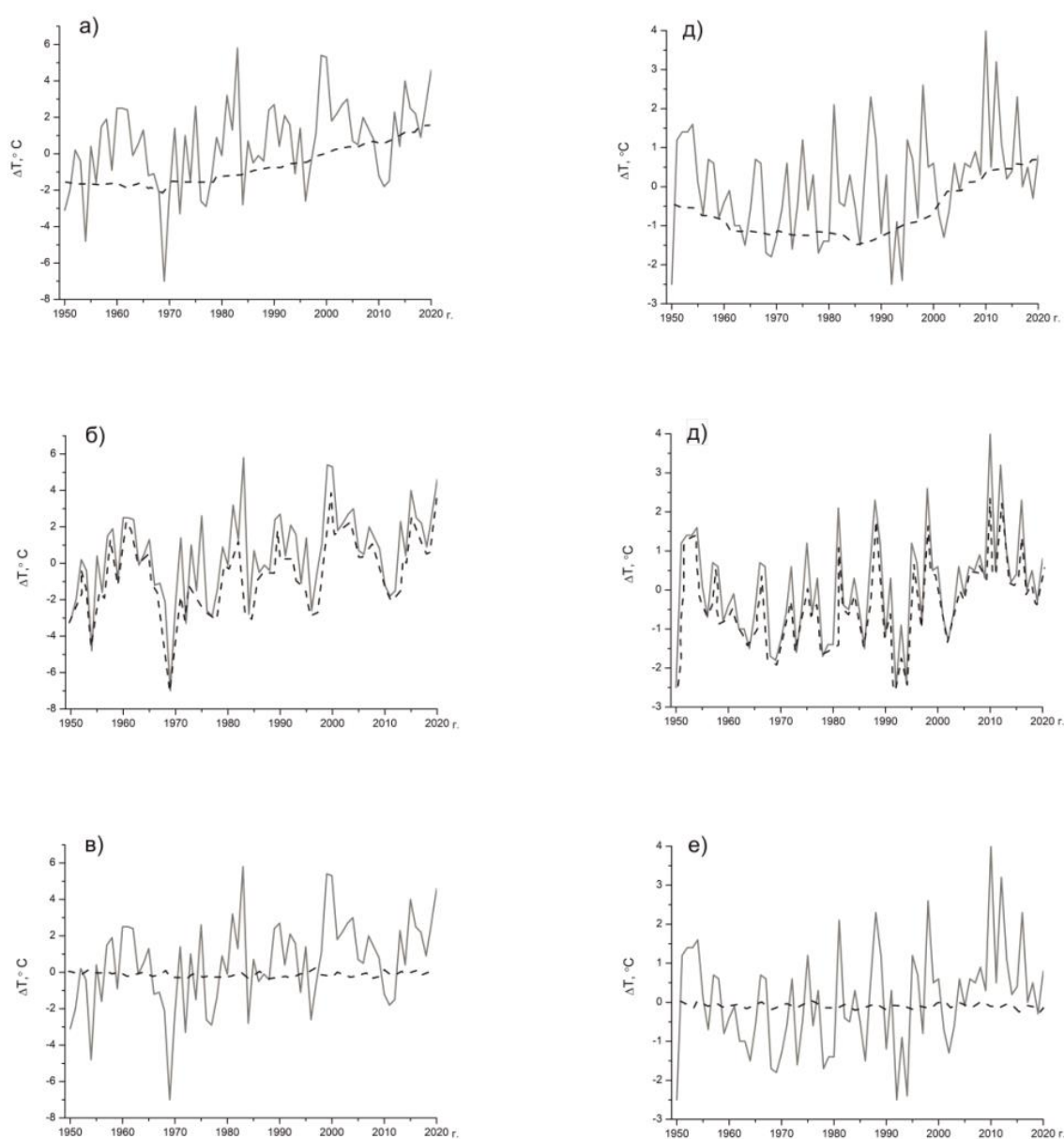


Рисунок 10. Зимняя температурная аномалия по Южному Уралу (сплошная), с вычетом (пунктирная) изменчивости, относящейся к суммарному вкладу для ЕОС1 (а), ЕОС2 (б) и ЕОС1+3 (в). Летняя температурная аномалия по Южному Уралу (сплошная), с вычетом (пунктирная) изменчивости, относящейся к суммарному вкладу ЕОС1 (г), ЕОС2 (д) и ЕОС1+2 (е).

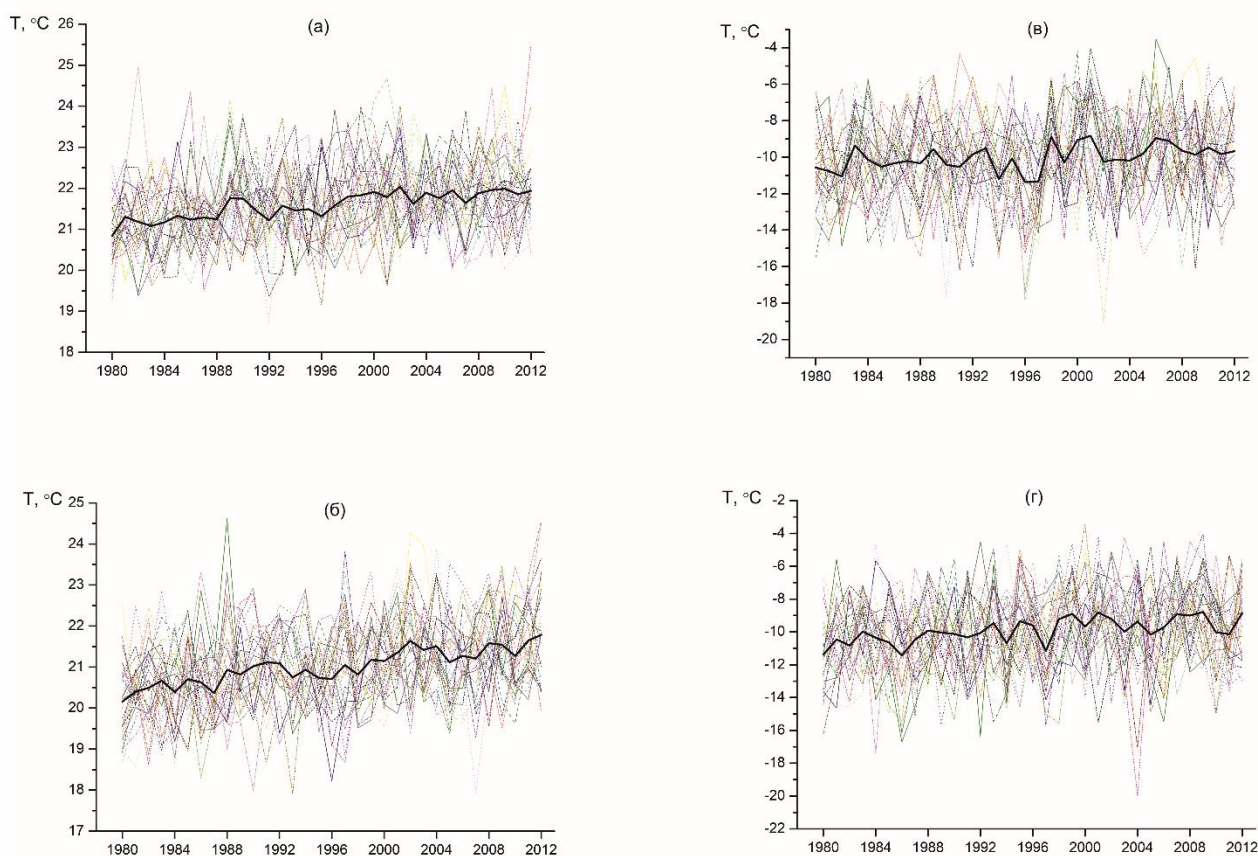


Рисунок 11. Значения приповерхностной температуры воздуха согласно модели ЕСНАМ5. Серым цветом обозначены результаты численного эксперимента, сплошной черной – среднееансамблевая по 30 сценариям с 1979 по 2012 гг.: а, б – летний период, в, г – зимний. Панели слева соответствуют модели с постоянной концентрацией парниковых газов на уровне 1980 г., справа с учетом динамики CO_2 , согласно наблюдениям.

Проведенное в работе моделирование установило положительные тенденции в температурных рядах среднееансамблевого значения теплого и холодного сезонов для обоих сценариев, что согласуется с глобальным потеплением. В целом по инструментальным данным приземной температуры воздуха для территории Южного Урала за 1979-2012 гг. установлена четкая тенденция роста в летние и зимние месяцы со значениями коэффициентов изменения $+0.6^\circ\text{C}/\text{годы}$. Изменение температурных тенденций за 1979-2012 гг., согласно результатов анализа по каждому из двух сценариев модели ЕСНАМ5 (60 реализаций), можно представить как результат суперпозиции вклада внутренней климатической изменчивости и глобальных изменений климата. В работе также показано, что сравнение температурного тренда инструментальных данных по Южному Уралу согласуется с некоторыми сценариями модели ЕСНАМ5. При этом отмечено, что большинство из этих реализаций в обоих сценариях демонстрирует тенденцию потепления климата, что и определяет среднееансамблевую тенденцию роста температуры. Используя модель общей циркуляции атмосферы ЕСНАМ5 были сделаны оценки прямого радиационного воздействия в изменения приземной температуры в последние десятилетия. Показано, что для всех выделенных сезонов сценарий с меняющимися концентрациями CO_2 и CH_4 , согласно наблюдениям, лучше описывает изменения температуры приземного слоя воздуха.

Глава 5 посвящена анализу пространственно-временной структуры ведущих режимов изменчивости сезонных атмосферных осадков на Южном Урале. Установлено, что с середины 60-х гг. прошлого века произошло изменение во внутригодовом распределении атмосферных

осадков на Южном Урале (рис. 12). В летний сезон атмосферных осадков стало выпадать меньше, в то время как в зимний период они, наоборот, возросли, что в целом привело к тому, что за последние 50 лет количество атмосферных осадков уменьшилось.

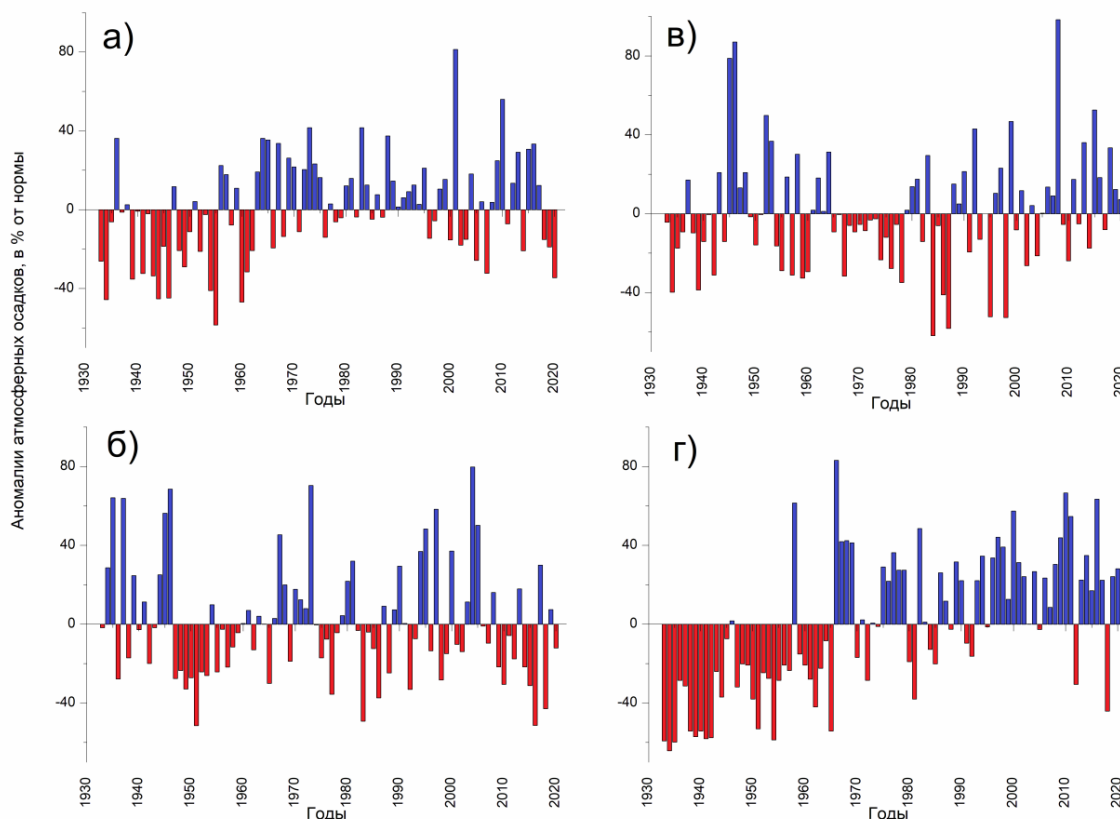


Рисунок 12. Аномалии атмосферных осадков на Южном Урале по инструментальным измерениям сети Росгидромет: а) осень (IX-XI), б) лето (VI-VIII), в) весна (IV-V), г) зима (I-III, XII).

В работе исследовались ведущие режимы совместной изменчивости сезонных (зима и лето) осадков на Южном Урале и были выделены аномалии крупномасштабных атмосферных циркуляций в Северном полушарии. При этом также установлены особенности структуры ведущих режимов изменчивости сезонных осадков, которые были выделены с помощью метода главных компонент. Построены карты ЕОС, имеющих три наибольших СЧ по расчетам за 1933-2020 гг., а также вычислены ЕОС4-12, СЧ которых очень малы (табл. 3). Для ЕОС1 летнего и зимнего сезонов определены аномалии осадков противоположных знаков, имеющих дипольную структуру в направлении север-юг, которая может быть объяснена как граница зон влияния Исландского минимума (циклон) и Азорского максимума (антициклон). ЕОС2 зимнего сезона представляет собой триполь с отрицательным очагом в центре и двумя положительными очагами на северо-западе и юго-востоке исследуемой территории, соответственно. В летний сезон ЕОС2 представляет собой обширный экстремум отрицательных аномалий осадков и меньшими по площади аномалиями положительного знака. У ЕОС3 летних месяцев экстремумы аномалий температуры находятся на северо-востоке (положительная), с незначительными по площади аномалиями на юго-западе и юго-востоке (отрицательная). Для ЕОС3 зимних месяцев характерен положительный очаг аномалии осадков на юго-востоке.

Проведен корреляционный анализ ЕОС средних месячных сумм атмосферных осадков с основными модами изменчивости (AMK, САК, АО, PE, EAWR, SCAND, PNA, SOI, PDO, Sea Ice Index Anomaly). В результате анализа было установлено, что наиболее тесная положительная связь ЕОС1 осадков зимнего сезона найдена с индексами САК (коэффициент корреляции 0,59), АО (0,47), а отрицательная значимая связь определена с SOI (-0,39). Для летнего периода установлены связи с индексами AMK (-0,55), EAWR (0,51), SOI (0,49) и Sea Ice

Index Anomaly (-0.52). Ведущая для ЕОС1 изменчивость осадков зимой связана с САК (и тесно с ним коррелированным АО) и SOI.

Таблица 3. Значения собственных чисел ковариационных матриц атмосферных осадков по сезонам и доли ЕОС1-12 в дисперсии разложения.

Собственное число (СЧ)	Зима (XII-II)		Лето (VI-VIII)		
	Дисперсия	Суммарная дисперсия	Собственное число (СЧ)	Дисперсия	Суммарная дисперсия
25,48	73,23	73,23	22,98	61,86	61,86
5,69	16,36	89,60	16,12	22,14	84,00
1,68	4,82	94,42	1,94	9,02	93,02
1,02	2,93	97,35	1,90	2,46	95,48
0,33	0,96	98,31	1,04	1,73	97,21
0,27	0,78	99,09	0,15	0,97	98,18
0,10	0,27	99,36	0,12	0,61	98,79
0,07	0,20	99,56	0,09	0,39	99,18
0,06	0,19	99,75	0,07	0,24	99,42
0,03	0,11	99,86	0,04	0,22	99,64
0,02	0,08	99,94	0,02	0,20	99,84
0,01	0,06	100	0,01	0,19	100

Корреляционный анализ для летнего сезона выявил статистически значимые корреляции ЕОС1 с АМК, САК, ЕАWR, SOI и Sea Ice Index Anomaly. Отмечено, что летняя ЕОС1 объясняет подавляющую часть общей изменчивости аномалий осадков (73%). Связь с циркуляционными индексами, полученная в результате корреляционного анализа, показала, что наибольший вклад в изменчивость зимних осадков на Южном Урале вносят два климатических индекса - САК и АО. Корреляционный анализ ЕОС2 зимних месяцев (доля которой 16% изменчивости) не выявил какой-либо значимой связи ни с одним из представленных климатических индексов. Временная динамика ЕОС3 зимней температуры по региону в целом, описывающая около 5% общей изменчивости, отрицательно коррелирует с изменчивостью САК и АО с коэффициентами корреляции -0,47 и -0,31, соответственно, а также с индексом SCAND ($r = -0,30$). В летний период, к которому по режиму атмосферной циркуляции относят период с июня по август, ЕОС1 для атмосферных осадков, полученных в результате анализа средней для лета и за каждый месяц в отдельности, описывают 62% ее общей изменчивости. Анализ на тесноту связи колебаний ЕОС2 ($\approx 22\%$ общей изменчивости) установил статистически значимую связь с климатическими индексами АМК, ЕАWR, SOI и Sea Ice Index Anomaly со значениями коэффициента корреляции -0,39, 0,30, -0,22 и -0,34, соответственно. Корреляционный анализ ЕОС3 (9% общей дисперсии) с климатическими модами не выявил никакой статистически значимой связи.

В **Главе 6** приводятся результаты анализа речного стока на примере бассейнов рек Белой и Урала. При анализе распределении годового стока этих рек учитывались следующие климатические факторы: общая увлажненность бассейна, испаряемость, особенность сезонных атмосферных осадков, включая их интенсивность и продолжительность, температура и влажность воздуха. Для установления степени пространственных связей во внутригодовом распределении стока данные инструментальных наблюдений по каждому из бассейнов (6 ГП по бассейну реки Урал и 7 ГП по бассейну реки Белая) коррелировались между собой на временном интервале 1961-2017 гг. Результат пространственной корреляции по средним годовым значениям стока в бассейнах рек Урал и Белая представлен на рис. 13. Из рис. 13 видно, что как по сезонам, так и по средним годовым значениям статистически значимые величины коэффициентов корреляции с большинством ГП в бассейне реки Урал наблюдаются

для ГП г. Оренбург – р. Урал, а в бассейне реки Белая для ГП р. Белая – г. Бирск. В то же время, наиболее слабая теснота связи по всем постам бассейна реки Урал выявлена для ГП г. Зилаир – р. Зилаир, что объясняется особенностью физико-географических условий этого поста, прежде всего связанных с пористостью пород слагающих Зилаирское плато, по которому протекает река, а также построенном в 2007 году водохранилище на реке Зилаир. Слабая теснота связи в бассейне реки Белая установлена для ГП д. Дюсяново – р. Дема; этот пост находится в верховьях бассейна реки Дема и наиболее удален от всех используемых в исследовании ГП. Учитывая все эти факторы, в работе проводится обсуждение результатов вычислительных процедур по отдельным сезонам на примере ГП р. Урал – г. Оренбург и ГП р. Белая – г. Бирск, являющимися замыкающими створами для всех 13 гидрологических постов и, в этом смысле, являющиеся наиболее репрезентативным для обоих бассейнов в отдельности.

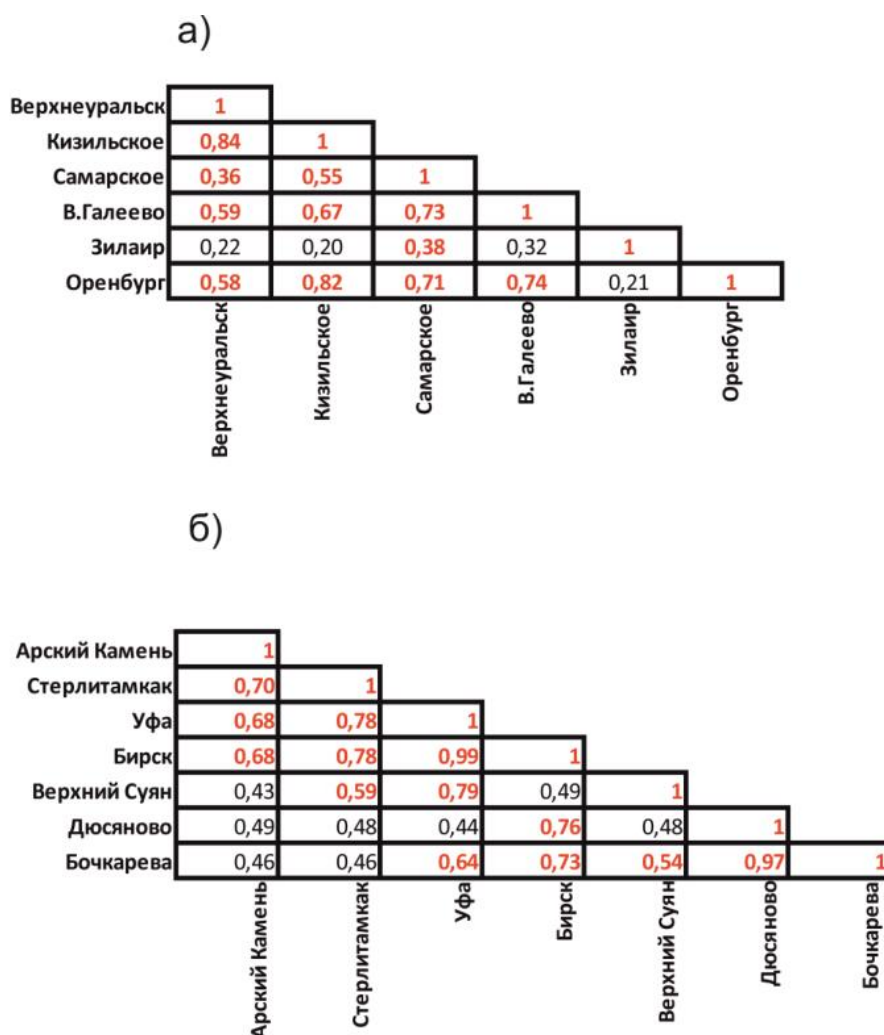


Рисунок 13. Корреляционная матрица средних годовых значений стока: а) бассейн реки Урал, б) бассейн реки Белой.

В работе установлено, что в период с 1936 по 2017 гг. речной сток зимнего и осеннего сезонов для обоих бассейнов увеличился (значения линейных трендов положительные и статистически значимые). Для средних годовых значений речного стока обоих бассейнов вычисленные значения линейного тренда положительные, но статистически незначимые (рис. 14), также статистически незначимыми оказались тренды летнего и весеннего сезонов. Такое поведение стока может быть объяснено влиянием глобального потепления на внутригодовое распределение атмосферных осадков на территории Южного Урала, что неминуемо отразилось на продолжительности и частоте опасных гидрологических явлений (Коронкевич и др., 2010).

При анализе стока в работе учитывался тот факт, что характерной особенностью большинства равнинных рек России является половодье, которое связано с таянием снежного покрова зимнего периода. Особенностью водного режима таких рек поэтому является то, что доля весеннего стока составляет 50–70 % (иногда до 80–90%) от годового стока (Мотовилов, Гельфан, 2018). Расходы воды в этот период может увеличиваться в сотни раз, по сравнению с зимними, и часто приобретают характер стихийных бедствий. При этом сток в половодье определяется тремя факторами: 1) количеством снега, аккумулированного зимой в речном бассейне, 2) количеством осадков, выпавших в период формирования половодья, 3) влагоемкостью речного бассейна. С физической точки зрения любой речной бассейн представляет собой динамическую систему и подчиняется закону сохранения массы. Применительно к речному бассейну этот закон выражается в виде уравнения водного баланса. В качестве косвенной характеристики влагонасыщенности бассейна были использованы данные осенних расходов воды в замыкающем створе на гидрологическом посту (ГП) г. Бирск – р. Белая. В основу модели было положено уравнение водного баланса (1) для речного бассейна в период половодья, имеющий вид (Попов, 1963):

$$Y = (S + X) - P, \quad (1)$$

где Y – слой стока за период [мм]; S –запасы воды в снежном покрове, максимальные за зиму [мм]; X –атмосферные осадки от даты наблюдения максимальных снегозапасов до конца периода [мм]; P –потери талых и дождевых вод за период [мм].

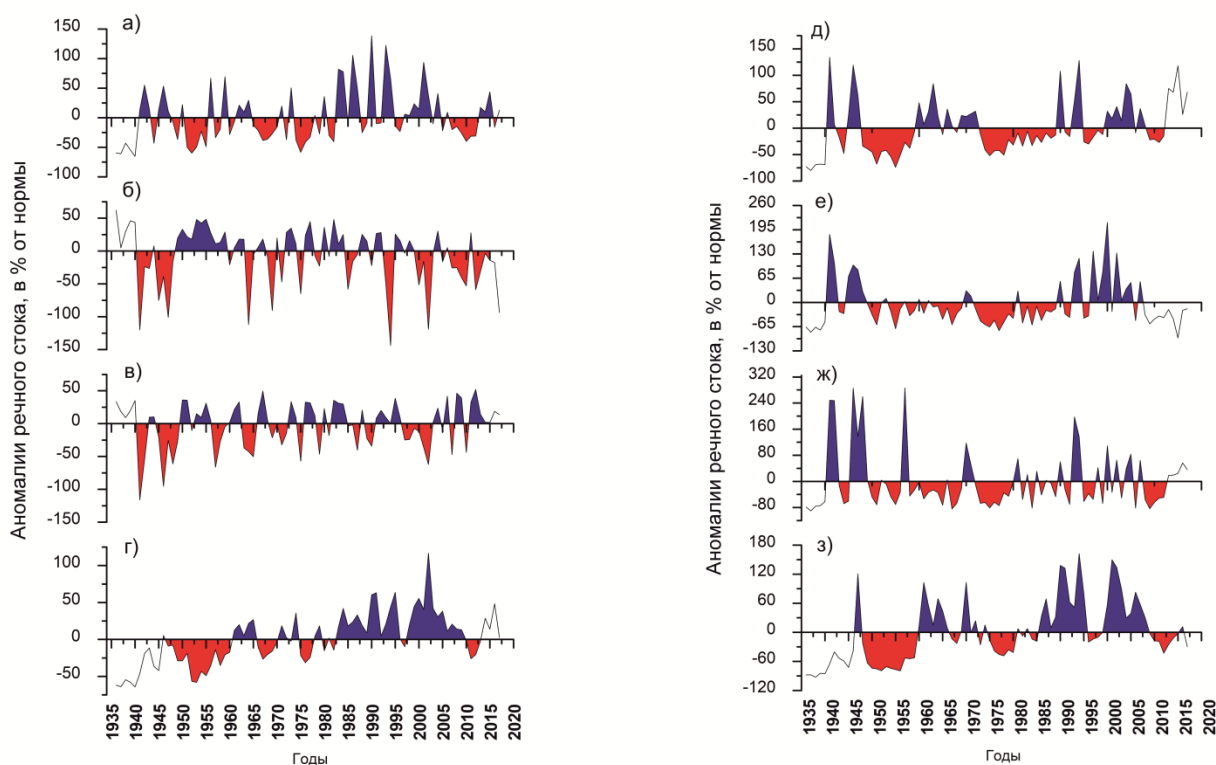


Рисунок. 14 Аномалии речного стока на ГП р. Белая – г. Бирск по инструментальным измерениям сети Росгидромет: а) осень, б) лето, в) весна, г) зима, и на ГП р. Урал – г. Оренбург по инструментальным измерениям сети Росгидромет: д) осень, е) лето, ж) весна, з) зима.

При решении уравнения (1) в работе учитывалось, что общая водосборная площадь бассейна реки Белая составляет 142000 км² и особенность формирования ее стока связана с сочетанием равнин, степей, лесов на западе и гор на востоке. Учитывая перечисленные особенности водного бассейна реки Белой, уравнение водного баланса для расчета гидрографа и прогноза весеннего стока решалось в работе в виде системы уравнений (2):

$$\left. \begin{aligned} Y_{(j)} &= S_{(j)} - P_{(j)} \tanh[S_{(j)}/P_{(j)}], \\ S_{(j)} &= a_1 S_{(j)} + a_2 X_{(j,k)} \exp(-a_3 \cdot k), \\ P_{(j)} &= a_4 \exp(-a_5 W_{(j)} [1 + a_6 L_{(j)}]), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $S_{(j)}$ – запасы воды в снеге на момент составления прогноза в j -ом году; $P_{(j)}$ – характеристика потерь стока; $X_{(j,k)}$ – количество атмосферных осадков в k -ом подпериоде, на которые разделен период от даты составления прогноза до конца второго квартала; $W_{(j)}$ – характеристика влагозапасов в бассейне; $L_{(j)}$ – глубина промерзания почвы; a_1, \dots, a_6 – параметры, значения которых определяется путем оптимизации. Система уравнений (2) обобщена на случай расчета прогнозов, когда сток в замыкающем створе формируется из нескольких частных бассейнах:

$$Y_{(j)} = \sum (a_{1(i)} S_{(i,j)} + a_{2(i)} X_{(i,j,k)} \exp[-a_{3(i)} k_{(j)}] - a_{4(i)} \tanh[S_{(i,j)}/P_{(i,j)}] \exp[-a_{5(i)} W_{(i,j)} (1 + a_{6(i)} L_{(i,j)}) + a_7] a_{8(i)}), \quad (3)$$

где i – порядковый номер частного бассейна; a_7 – свободный член; a_8 – параметры равные доли площади i -го частного бассейна от общей площади бассейна.

Критерий качества, при котором оптимизировались параметры уравнений, задавался в следующем виде:

$$\Delta / \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (Y_j - \tilde{Y}_j)^2}{n \sum_{j=1}^n (\bar{Y}_j - \tilde{Y}_j)^2}}, \quad (4)$$

где Δ – средняя квадратическая ошибка прогноза; σ – средняя квадратическая изменчивость предсказанной величины; Y_j – фактический сток за расчетный период; \tilde{Y}_j – предсказанные значения стока; \bar{Y}_j – среднее многолетнее значение стока за второй квартал; n – число лет в выборке.

В ГП, расположенных на реке Белой, использовалась выборки данных наблюдений за 84 года, длительность ряда наблюдений за стоком в бассейне реки Демы составила 72 года. Проведенный на основе Фурье-фильтрации спектральный анализ выявил специфику временной динамики стока. Решение системы уравнений (2) позволило установить общую тенденцию в изменении стока на всех трех ГП – наличие двух полных циклов с отчетливым минимумом в середине 70-х годов, тогда как на временных интервалах 1940-1950 гг., 1970-2000 гг. и с 2010 года по настоящее время сток увеличивался, а на интервалах 1960-1970 гг. и 2000-2010 гг. сток уменьшался.

В качестве стокоформирующих факторов брались значения максимальных за зиму запасов воды в снежном покрове, влажности почвы, глубины промерзания почвы, осенне-зимнего стока. Используя метод триангуляции, в работе было произведено пространственное осреднение данных наблюдений по первым трем факторам. Учитывая тренды стока и схожих с ними тенденций стокоформирующих факторов, была разработана схема для оптимизации структуры и параметров прогностического уравнения, в которой обрабатывались значения стока за 1977-2017 гг., а в качестве проверочной модели были выбраны значения стока за 1936/1946-1976 гг., При этом в формуле (4) величина n определялась по всей выборке за 1936/1946-2017 гг., Δ – индивидуально для каждой выборки, а величина допустимой ошибки ($\delta = \pm 0.674\sigma$) вычислялась для всей выборки.

Процедура оптимизации структуры и параметров уравнений модели осуществлялась на основе метода наименьших квадратов, с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта, в котором налагались ограничения на параметры модели и на значения входных данных. Параметры a_1, a_4, \dots, a_7 во всех уравнениях находились путем оптимизации в пределах следующих заданных границ:

$$\begin{aligned} 0,1 \leq a_1 \leq 1,0 & & 0,001 \leq a_5 \leq 0,1 \\ 100,0 \leq a_4 \leq 1000 & & 0,001 \leq a_6 \leq 0,1 \\ 20,0 \leq a_7 \leq 100 & & \end{aligned}$$

Одновременно, путем итераций, определялись границы входных данных по расходам воды и глубине промерзания почвы. Использование этих ограничений позволило повысить точность прогнозов на 15–20 %. Согласно принятому критерию Δ/σ из формулы (4), в работе были приняты следующие параметры для составления долгосрочных прогнозов: $\Delta/\sigma = 0,52–0,71$, при обеспеченности допустимой ошибки прогнозов $67\% \leq P \leq 86\%$. Точность прогностического уравнения на зависимой выборке повысилась на 30 %, но при этом число параметров возросло в два раза. Представленная в работе модель весеннего стока, на примере бассейна реки Белой дала приемлемые, с точки зрения надежности прогноза, результаты. Разработанный в программе алгоритм для решения системы уравнение (2) для водного баланса рек позволяет производить расчеты с учетом практически неограниченного числа частных бассейнов и, как следствие, обрабатывать большие массивы входных данных.

Глава 7 диссертационной работы посвящена оценке тенденций изменения засушливости территории Южного Урала. Здесь же приводятся оценки влияния метеорологических условий на пожарную опасность и уровень загрязнения атмосферного воздуха. Согласно устоявшейся гидрометеорологической практике, в работе анализировались индексы засушливости, индекс атмосферной засушливости или индекс Педя S , представляющий собой разность стандартизированных значений аномалий температуры воздуха T и атмосферных осадков P :

$$S = T/\sigma(T) - \Delta P/\sigma(P), \quad (5)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение средних значений температуры и осадков.

Для характеристики степени засушливости региона Южного Урала в работе рассчитывались два типа индексов - Селянинова и Пальмера. Гидротермический коэффициент увлажнения (ГТК) или индекс Селянинова определялся как отношение сумм осадков R , к сумме активных температур T (показатель, характеризующий период активной вегетации сельскохозяйственных культур), уменьшенное в 10 раз, за идентичные периоды времени:

$$\text{ГТК} = R/0.1 \sum T. \quad (6)$$

Для определения индекса Палмера (Palmer Drought Severity Index или PDSI), характеризующего засушливость, использовалась формула (7):

$$PDSI_i = 0.897PDSI_{i-1} + Z_i/3, \quad (7)$$

где i – временной интервал, как правило, месяц; Z – индекс аномалии влажности Палмера, который, в свою очередь, рассчитывался как:

$$Z = Kd. \quad (8)$$

K – весовой климатический показатель, d – параметр представляющий собой разность между значениями сумм атмосферных осадков и уравнением водного баланса.

В работе также производились оценки стандартизированного индекса осадков (Standardized Precipitation Index – SPI), вычисление которого состояло в том, что данные по атмосферным осадкам трансформировались в нормальное (гауссово) распределение в котором среднее значение индекса в рассматриваемый временной период равнялось нулю, а среднеквадратическое отклонение – единице.

Для расчета этих индексов в работе учитывались средние суточные данные по приземной температуре и суточные суммы атмосферных осадков за период 1960-2020 гг., полученных из единого государственного фонда ФГБУ «ВНИГМИ-МЦД» Росгидромета, по 20 метеорологическим станциям, расположенным на территории Южного Урала. Главным результатом этих расчетов было установление достаточно интенсивной аридизации территории Южного Урала за последние десятилетия. При анализе всех четырех индексов засушливости в летний сезон были отчетливо отслежены два наиболее ярких случая экстремальной засухи в 1975 и 2010 гг. На рис. 15 бордовым цветом обозначены периоды экстремальной засушливости,

а синим – области экстремальной влажности. Главными причинами таких засух, как предположено в работе, были блокирующие летние антициклоны, под влиянием которых на территории Южного Урала наблюдалась жаркая и сухая погода, а также предшествующая им аномально холодная зима, способствующая глубокому промерзанию почвы, что в конечном, итоге способствовало тому, что большая часть выпавших атмосферных осадков зимне-весеннего периода трансформировалась в речной сток и усугубляло начавшуюся засуху. В работе был сделан вывод, что наблюдающиеся в последние 20 лет продолжительные засушливые периоды, скорее всего, связаны с изменением во внутригодовом распределении атмосферных осадков, а именно с увеличением доли осадков осенне-зимнего сезона по сравнению с осадками весенне-летнего периода.

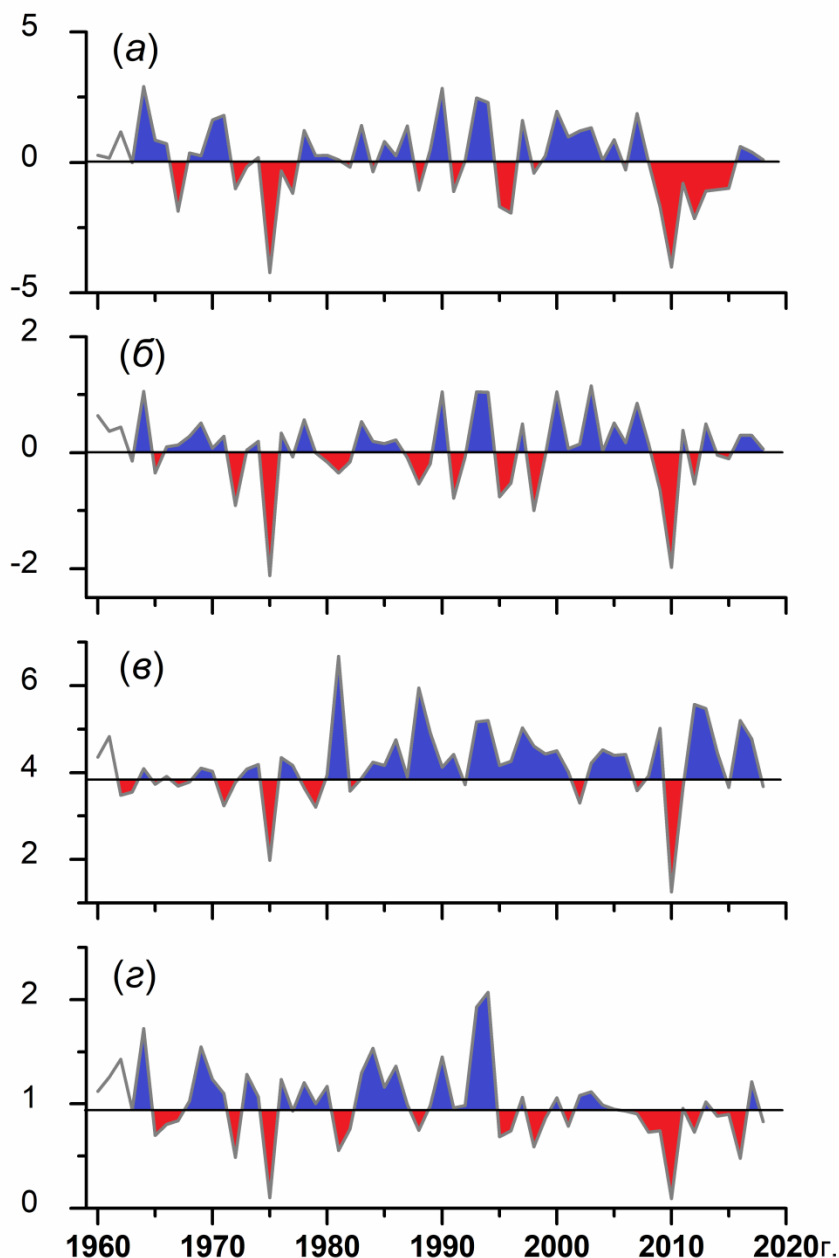


Рисунок 15. Периоды засух (красные) и увлажнения (синие) на Южном Урале за 1960-2019 гг.: PDSI (а), SPI (б), Индекс Педея (в) и индекс Селянинова (г).

Для пространственной оценки всех четырех индексов была произведена площадная визуализация, представленная на рис. 16, из которой становится очевидным сходство ареала распространения засушливых и переувлажненных областей на Южном Урале по всем четырем индексам. Переувлажненными являются горнолесная область и некоторые части лесостепной

зоны, а более засушливые – это большая часть лесостепной и степная зоны, а также Зауралье. Такое распространение ареалов засушливости/увлажненности объясняется физико-географическими особенностями территории Южного Урала, прежде всего барьерным эффектом Уральских гор, наличием крупных возвышенностей, а также в целом широтной поясности на Земле.

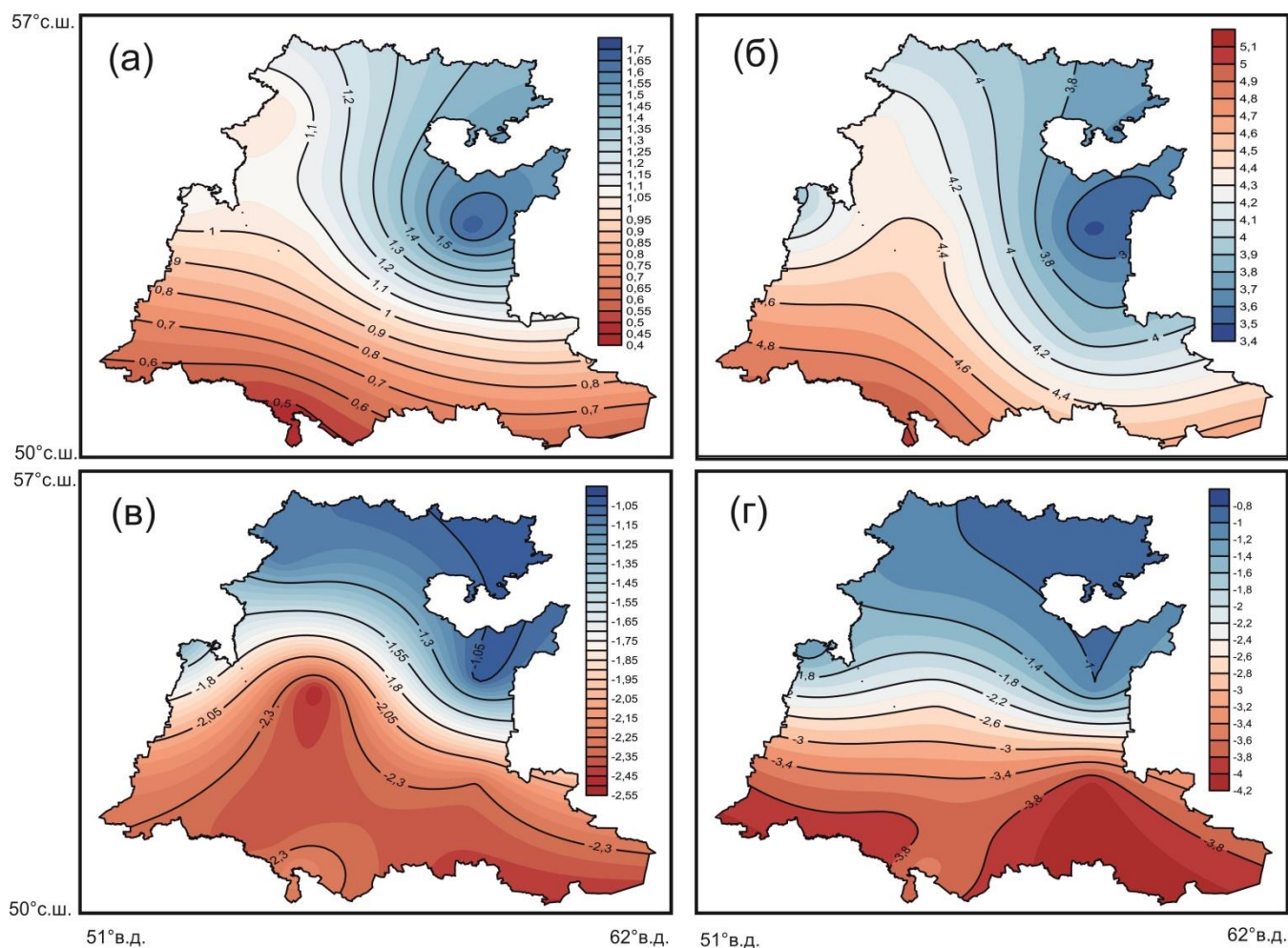


Рисунок 16. Пространственное распределение индексов засушливости за 1960-2019 гг.: индекс Селянинова (а), индекс Педя (б), SPI (в) и PDSI (г).

В работе был проведен анализ для выяснения наилучшего для исследуемого региона индекса, объясняющего большинство выявленных природных аномалий. Для этого был произведен сравнительный и корреляционный анализы, результаты которого представлены в табл. 4. Наибольшее значение коэффициента линейной корреляции Пирсона отмечено у ГТК (индекс Селянинова) со всеми тремя остальными индексами засушливости. Сравнительный анализ заключался в сопоставлении экстремальных значений индексов засушливости и инструментальных данных приземной метеорологии и дал схожие с корреляционным анализом результаты. По этой причине частотно-временной анализ производился в работе только по индексу Селянинова.

Сам частотно-временной анализ осуществлялся на базе вычисления основных статистических характеристик и вейвлет преобразования. Доминирующим и статистически значимым циклом на 60-летнем временном интервале установлена квазидесятилетняя гармоника. С учетом этого, в целях выявления тенденции вариации ГТК, дальнейшие сравнения изменчивости производились в работе по десятилетиям. В данном случае, 60-летний ряд данных индекса Селянинова был разделен на шесть квазидесятилетних периодов (I – 1960-1970 гг., II – 1971-1980 гг., III – 1981-1990 гг., IV – 1991-2000 гг., V – 2001-2010 гг. и VI – 2011-2019 гг.). Затем на основе общепринятой в гидрометеорологической практике градации ГТК, было

произведено ранжирование вычисленных значений индекса Селянинова. При этом отбирались значения ГТК равные 0,6 и менее – эквивалентные экстремально засушливым условиям, по летнему сезону в целом и по отдельным трем теплым месяцам. Установлено, что для территории Южного Урала отмечалось уменьшение засушливости в июне, августе и рост засушливости в июле. В целом за летний сезон выявлена тенденция увеличения количества происходящих засух.

Таблица 4. Корреляционный анализ временных серий индексов засушливости за 1960-2019 гг.

Индекс	Селянинова	Педя	SPI	PDSI
Селянинова	1	0,33	0,79	0,69
Педя	0,33	1	0,32	0,22
SPI	0,79	0,32	1	0,80
PDSI	0,69	0,22	0,80	1

Жирным шрифтом выделены статистически значимые величины линейного коэффициента корреляции Пирсона r на уровне $p=0,001$, при $n = 60$.

В этой же главе работы были исследованы причины возникновения, развития и распространения природных пожаров и их связь с погодными условиями. Был также рассмотрен вопрос о природных пожарах как одном из индикаторов климатических изменений. В работе рассматривались два индекса пожарной опасности (ПО), один из которых наиболее распространен в России, комплексный показатель пожарной опасности В.Г. Нестерова G (КППО), рассчитываемый по формуле:

$$G = \sum_{i=1}^n T_i D_i, \quad (9)$$

где T – температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$); D – дефицит точки росы; n – число дней после последнего дождя. Показатель G рассчитывается на текущий день и его размерность выражается в [$^{\circ}\text{C}^2$].

Другой индекс ПО, рассмотренный в работе, был к индекс лесной пожарной опасности А.Г. Макартура (ИЛПО)/McArthur Forest Fire Danger Index (FFDI), формализующий влияние относительной влажности воздуха, максимальной температуры воздуха, осредненное значение скорости ветра и показателя влажности/засухи, который вычислялся по формуле (10):

$$FFDI = 2e^{(-0.45+0.987 \ln DF-0.0345RH+0.0338T+0.0234V)}, \quad (10)$$

где DF – показатель влажности/засухи (Drought Factor), который задается числом от 0 до 10 и определяет степень готовности к воспламенению, учитывающий отчасти экологические факторы; RH – относительная влажность (Relative Humidity) выражается в %; T – температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$); V – осредненная скорость ветра (км/ч).

В работе было проведено сравнение индексов Нестерова (КППО) и Макартура(ИЛПО) и степень корреляции этих индексов с фактическими показателями природных пожаров. По полученным значениям КППО и ИЛПО, с помощью специализированных шкал, определялся класс и степень пожарной опасности. Проведенный анализ по отдельным МС Южного Урала для обоих индексов установил общую тенденцию как увеличения числа дней с максимальными значениями индексов ПО выше критических, так и определил сами максимальные значения КППО и ИЛПО за период наблюдения 1995-2000 гг. При этом на интервале 2000-2005 гг. наибольший рост экстремальных значений индексов выявлен в июле и установлены факты уменьшения максимальных значений индексов ПО и количества дней со значениями индексов выше критических. На рис. 17 приведены результаты вычислений индексов ПО для МС Зилаир. Следует отметить, что при установленных общих тенденциях в увеличении числа дней с максимальными значениями индексов ПО выше критических, ИЛПО по сравнению с КППО, найден как более достоверно учитывающим степень пожарной опасности.

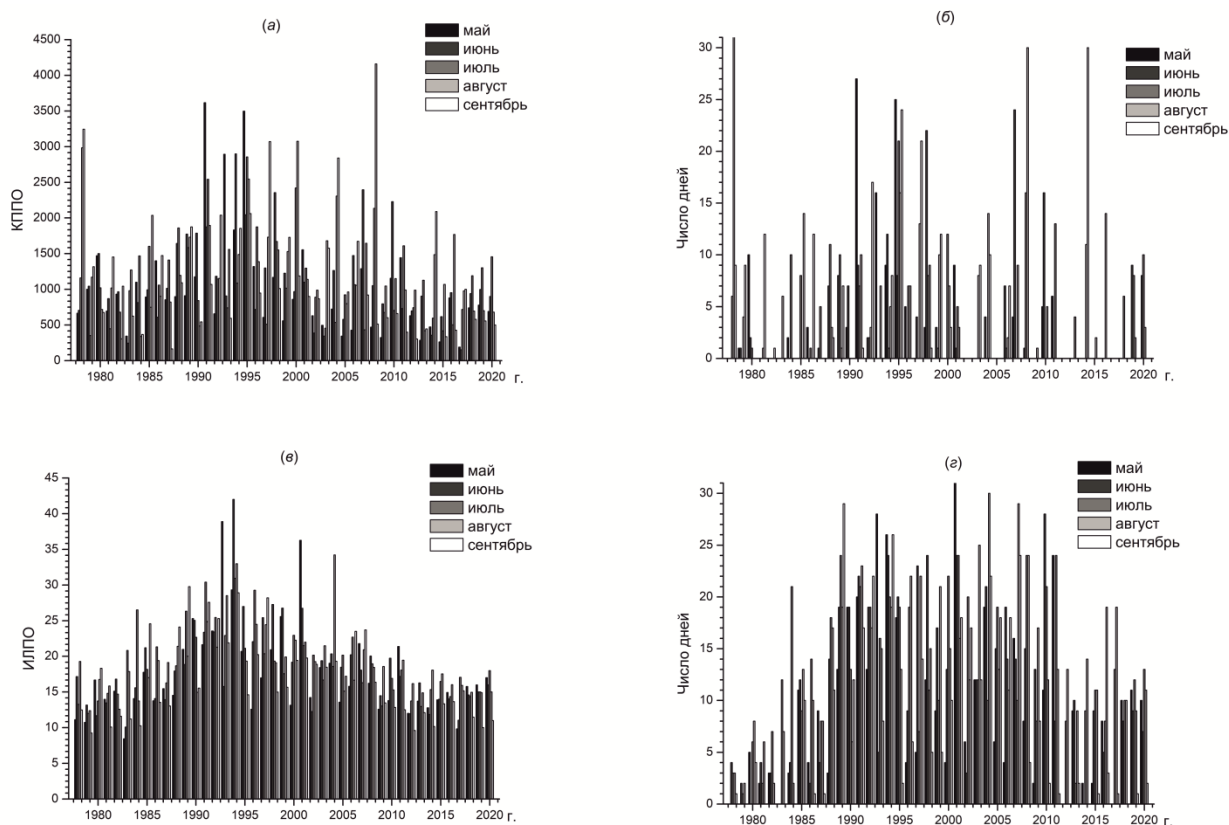


Рисунок 17. Динамика максимальных значений индексов пожарной опасности в весенне-летне-осенний период для МС Зилаир за 1978-2020 гг.: (а) – КППО, (в) – ИЛПО и число дней с максимальным значением индексов пожарной опасности больше критического для месяцев с мая по сентябрь за 1978-2020 гг.: (б) – дни с КППО ≥ 1000 , (г) – дни с ИЛПО ≥ 24 .

В таблице 5 приведены результаты корреляционного анализа числа дней со значениями индексов пожарной опасности выше критических (для КППО ≥ 1000 , ИЛПО ≥ 24) с фактическими данными о лесных пожарах (число лесных пожаров и лесная площадь, пройденная пожарами), за последние два десятилетия. Фактические данные по лесным пожарам взяты из Единой межведомственной информационно-статистической системы. Значения коэффициентов корреляции для ИЛПО, по сравнению с КППО, оказались выше, как в целом для весенне-летне-осеннего периода, так и для отдельных месяцев периода.

Таблица 5. Значения коэффициентов корреляции числа суток за год со значениями индексов пожарной опасности, превышающих критические с фактическими данными о лесных пожарах (за 1992-2020 гг.) для территории Южного Урала*

Месяцы	V	VI	VII	VIII	IX	V-IX
Число лесных пожаров						
КППО	0,13	0,28	0,10	0,14	-0,05	0,20
ИЛПО	0,23	0,32	0,20	0,19	0,46	0,21
Лесная площадь, пройденная пожарами						
Месяцы	V	VI	VII	VIII	IX	V-IX
КППО	0,19	0,33	0,15	0,19	0,11	0,25
ИЛПО	0,35	0,52	0,37	0,26	0,55	0,47

* Жирным шрифтом выделены статистически значимые значения коэффициента корреляции, при $n=21$, $p=0,05$.

Для оценки частоты возникновения таких метеорологических условий в теплый период года (май-сентябрь) выполнено сопоставление максимальных значений КППО и ИЛПО (рис. 17(а, в)) с числом суток в году со значениями индексов пожарной опасности выше критических

за 1978-2020 гг. (рис. 17(б, г)). Выбор периода мая-сентябрь был обусловлен физико-географическими условиями степной и лесостепной зоны Южного Урала и связи таковых с частотой возгораний/пожаров, максимум которых приходится именно на это время года.

Выявлено совпадение экстремальных значений индексов ПО с наиболее засушливыми годами: июнь 1995, июнь-август 2010, июнь-июль 2020 гг. Произведено также сравнение дней с низкими и экстремально высокими значениями индексов ПО со снимками высокого разрешения спутника Terra-MODIS для исследуемой территории Южного Урала. В определенные дни установлено совпадение экстремально высоких значений индексов ПО с датами действия пожаров. В качестве иллюстрации на рис. 18 приведены спутниковые снимки одной и той же территории для дня с экстремально высоким индексом ПО (15.07.2020, рис. 18(а)), когда на спутниковом снимке видно несколько очагов природных пожаров, и с низким значением индекса ПО (31.08.2016, рис. 18(б)), когда пожаров не было. Большинство индексов ПО практически не могут учитывать антропогенных факторов.

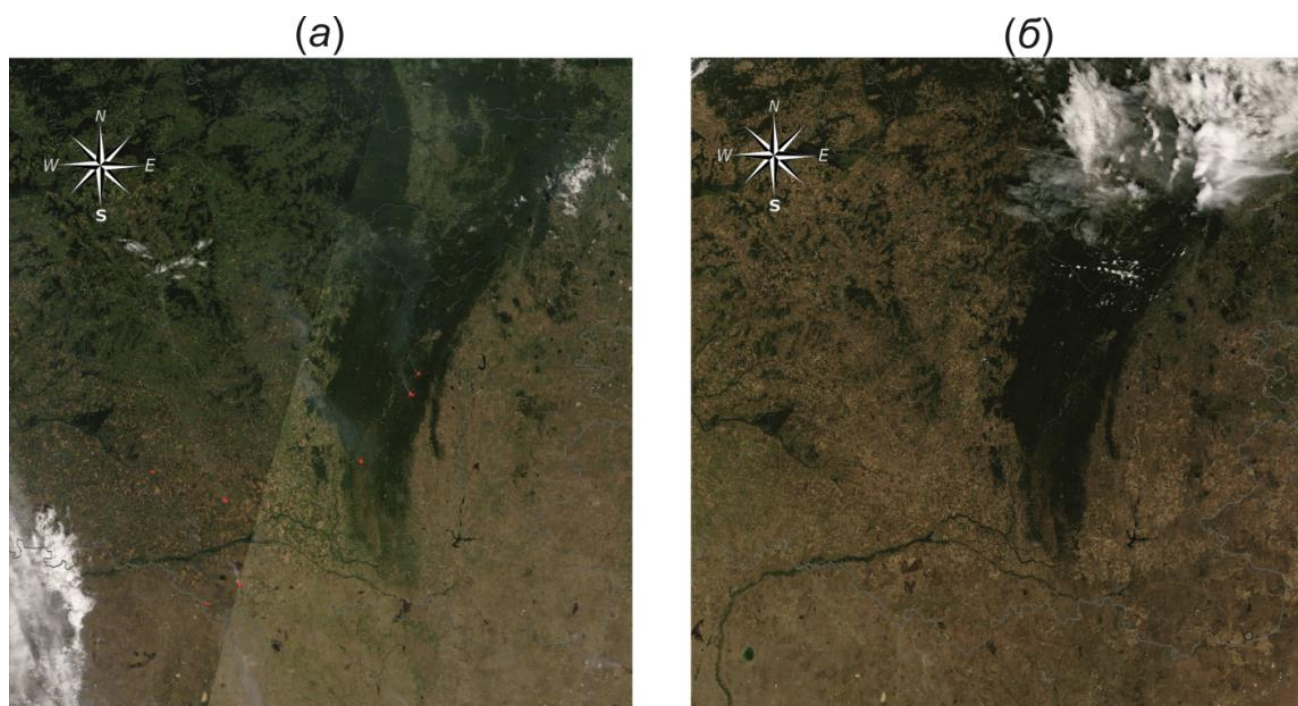


Рисунок 18. Снимки со спутника Terra-MODIS территории Южного Урала, с максимальным разрешением 250 м: (а) – 15.07.2020 г.; (б) – 31.08.2016 г., показывающие очаги пожаров (отмечены красными пикселями) и их дымовые шлейфы. Серыми линиями обозначены границы государств и регионов (субъектов Российской Федерации и Республики Казахстан).

В заключительной части главы 7 диссертационной работы приводятся результаты исследования по влиянию глобального потепления на метеорологические условия в крупных городах региона на примере города Уфы. В качестве основных компонентов загрязнения атмосферы, обусловленных антропогенной деятельностью, в работе учитывались сернистый газ (SO_2), оксид углерода (CO), диоксид углерода (CO_2), окислы азота (NO_x), сероводород (H_2S), различные углеводороды и аммиак (NH_3). Город Уфа расположен в пределах Прибельской равнины, в 100 км к западу от хребтов Урала. Базой для анализа в работе послужили ежедневные данные инструментальных наблюдений с 2017 по 2021 гг., произведенных на 9 стационарных станциях, расположенных в городе Уфе (рис. 19) и принадлежащих Росгидромету. Все станции были подразделены на «городские фоновые», расположенные в жилых районах Уфы (станции 1, 12, 16 и 17), «промышленные», находящиеся вблизи предприятий (станции 14, 18) и «придорожные», локализованные вблизи автомагистралей, в районах с интенсивным движением транспорта (станции 2, 5 и 23). Первоначально государственная наблюдательная сеть за состоянием окружающей среды в Уфе включала 23 станции, но за последние десятилетия количество станций сократилось до нынешних 9, именно

поэтому инвентаризационные номера станций не имеют строгой последовательности. Важно отметить, что регулярные наблюдения на стационарных станциях проводятся по неполной программе с целью получения информации о разовых концентрациях загрязняющих веществ ежедневно в 7, 13 и 19 часов местного декретного времени.

Для получения профилей температуры и оценки воздействия города на пограничный слой атмосферы был использован уникальный прибор отечественной разработки – метеорологический вертикальный температурный профилемер (МТП-5). Данный прибор настроен на измерение собственного теплового излучения атмосферы на частоте 60 ГГц, с разрешением по вертикали 50 м, дискретностью измерений каждые 5 мин и диапазоном высот от 0 до 1000 м.

В работе отмечено, что в результате взаимного наложения и перемешивания выбросов из многих источников в городе Уфе в целом формируется общегородское загрязнение воздуха. В связи с этим, большие концентрации вредных веществ были замечены вне зоны прямого действия источников выбросов этих веществ в атмосферу. Установлено, что загрязнение воздуха под влиянием метеорологических условий может одновременно изменяться на всей территории города и должно, поэтому характеризоваться обобщенным (интегральным) показателем, который в работе вычислялся по материалам инструментальных наблюдений. Основываясь на общепринятую практику в метеорологии и геоэкологии, таким интегральным показателем в работе использовался параметр P , который рассчитывался по формуле (11):

$$P = \frac{m}{n}, \quad (11)$$

где n – общее количество наблюдений за концентрацией примесей в городе в течение одного дня на всех стационарных постах; m – количество наблюдений в течение этого же дня с концентрациями q ($\text{мг}/\text{м}^3$), которые превышают среднее значение $q_{\text{ср}}$ более чем в 1,5 раза ($q > 1,5q_{\text{ср}}$). Таким образом, параметр P представляет собой отношение количества существенно превышенных концентраций (относительно среднего значения) к общему числу измерений в течение дня.

В работе приводятся значения предельно допустимых концентраций примесей в атмосфере и проведено ранжирование параметра P согласно (Сонькин, 1991). При этом установлено, что в Уфе имеется более 60 стационарных источников загрязнения, большинство из которых, однако, производят незначительные выбросы. Главные источники загрязнения атмосферы расположены в северной части Уфы, что создает крайне неблагоприятные условия для сохранения оптимального состояния атмосферы в промышленной зоне.

Орографические особенности Уфы (вытянутое с северо-востока на юго-запад Уфимское плато, на котором расположена основная часть города, и наличие речных долин с близкой к меридиальной ориентацией) в сочетании с метеорологическими условиями способствуют формированию концентрических ореолов загрязнения, что также было отмечено в работе. Преобладающими ветрами в Уфе являются, в основном, южные и юго-восточные ветра (рис. 20), что в целом благоприятно сказывается на качестве атмосферного воздуха на большей территории города, поскольку загрязняющие атмосферу вещества переносятся на север или северо-запад. В работе отмечается, что основной вклад в суммарные выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников в Уфе вносят предприятия нефтеперерабатывающей промышленности (73,1%) и электроэнергетики (7,5%), а также автомобильный транспорт (19,4%). В целом объем стационарных источников за 2017-2020 гг. составил $128,5 \cdot 10^3$ т, при этом увеличение выбросов составило $31,3 \cdot 10^3$ т. (24,4%). В работе отмечено, однако, что уровень загрязнения в Уфе за период 2017-2020 гг. установлен низким и определялся, в основном, содержанием в атмосфере города диоксида серы, ксилолов и толуола.

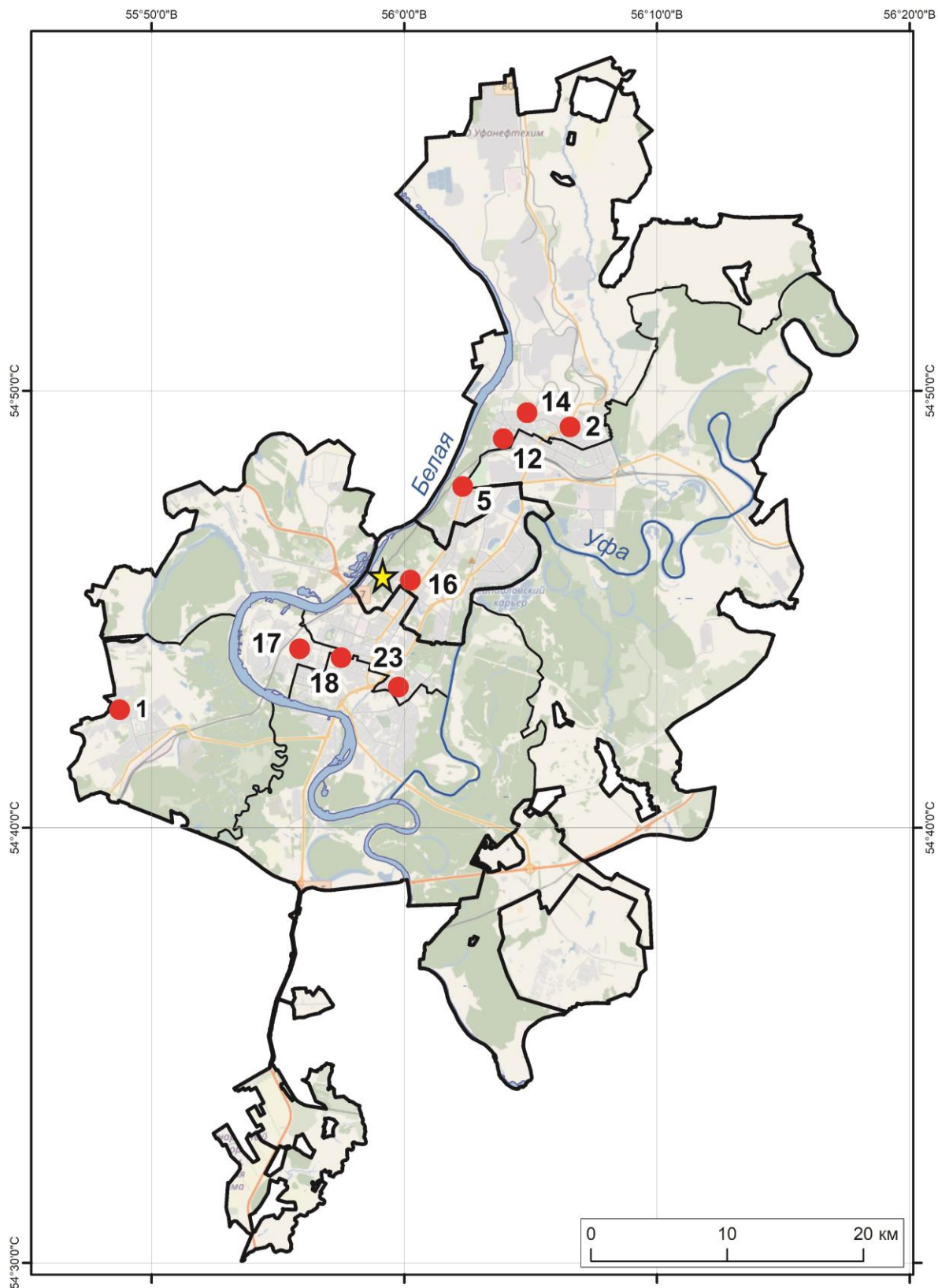


Рисунок 19. Карта города Уфы с выделенными административными округами: красными точками обозначены 9 стационарных станций государственной наблюдательной сети за состоянием окружающей среды; желтой звездочкой – расположение метеорологического вертикального температурного профилера (МТП-5) Слой карты, содержащий лесные массивы, гидрографию местности, автомобильную инфраструктуру и городские постройки, сгенерирован с использованием приложения Яндекс-карты (<https://yandex.ru/maps>).

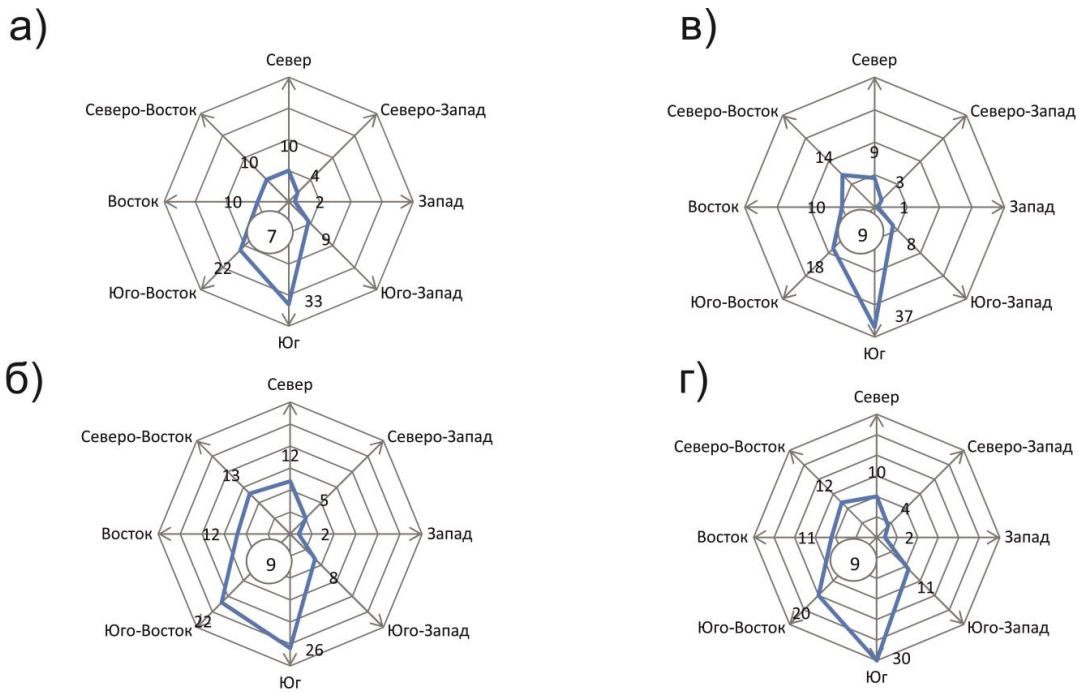


Рисунок 20. Векторная диаграмма годового режима ветра в городе Уфа (роза ветров): а) 2017 г.; б) 2018 г.; в) 2019 г.; г) 2020 г. Цифрами обозначена частота (повторяемость) ветров различного направления в %, значение в центре круга это частота проявления штиля.

Использованные в работе показания микроволновое зондирование нижних слоев атмосферы позволило с высоким пространственно-временным разрешением определить характер устойчивости и свойственные пограничному слою атмосферы явления приземных инверсий. На годовой выборке инструментальных данных МТП-5 за 2017-2021 гг. для уровней в диапазоне 0–1000 м в работе были вычислены градиенты температур.

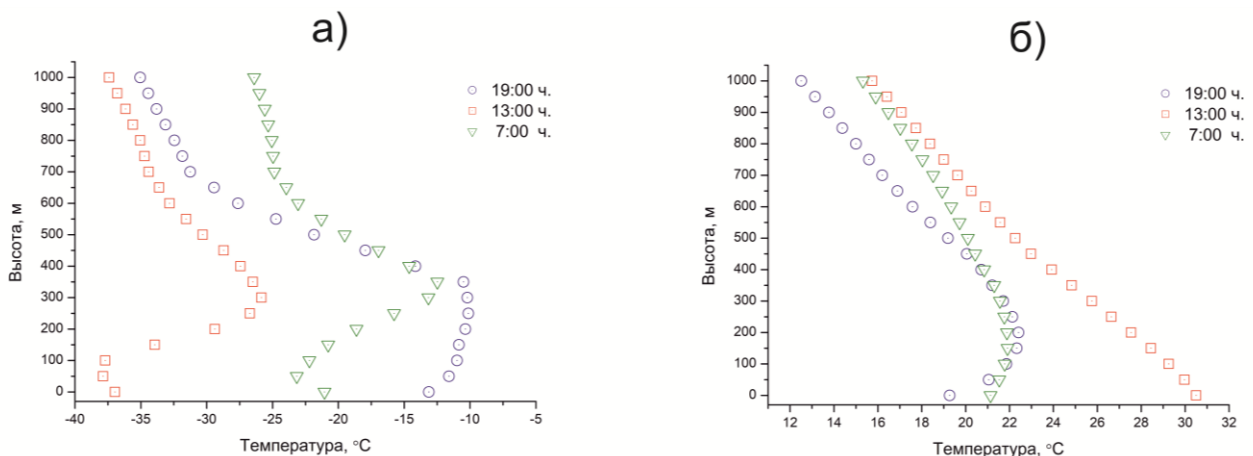


Рисунок 21. Температура воздуха в 1000-метровом слое над городом Уфа: (а) 23/01/2021 г. и (б) 22/08/2021 г.

Также была создана отдельная выборка данных об инверсиях в городе Уфе за 2017-2021 г. Необходимо отметить тот факт, что в некоторые из дней, когда значения параметра загрязнения атмосферы было условно повышенным ($P \geq 0,35$), одновременно наблюдались температурные инверсии над Уфой с верхней границей до 300 м независимо от времени суток и года (рис. 21). Как неоднократно отмечалось в литературе (Bai et al, 2022; Yang, Shao, 2021), температурная инверсия, является одной из причин увеличения концентрации загрязняющих веществ в атмосфере.

Таблица 6. Средние многолетние значения (нормы) метеорологических характеристик по городу Уфа с 2017 по 2021 гг.

Метеорологическая характеристика	Многолетнее значение
Осадки, количество дней	197
Повторяемость приземных инверсий температуры, %	39
Повторяемость застоев воздуха, %	28
Повторяемость ветров со скоростью 0-1 м/с, % (независимо от инверсий)	31
Повторяемость ветров со скоростью 0-1 м/с, % (без приземных инверсий)	9
Повторяемость приподнятых инверсий температуры, %	56
Повторяемость туманов, %	0,5

Таким образом, результаты проведенного в работе анализа (табл. 6) позволяют утверждать, что метеорологические условия за последние пять лет (2017-2021 гг.) способствовали увеличению концентрации загрязняющих веществ в атмосфере города Уфы. По проведенной оценке установлено, что в дневные часы в теплое и холодное время года остров тепла существенно размывается, а ночью усиливается.

В Заключение сформулированы основные выводы диссертационной работы:

1. Проведенный вейвлет анализ инструментальных данных приповерхностной температуры воздуха, атмосферных осадков и речного стока на Южном Урале позволил выявить циклы, которые можно условно разделить на высокочастотные с периодами от 2,3 до 7,1 года и низкочастотные от 11,2 до 50-60 лет.
2. Применение кросс-вейвлет анализа позволило установить высокую степень связи ($r = 0,85-0,92$) с Североатлантическим колебанием в высокочастотной области колебаний, а для низкочастотной области колебаний была установлена высокая степень связи ($r = 0,87-0,96$) с индексом Атлантического мультидекадного колебания и с индексом Арктической осцилляции.
3. Установлено, что основным климатическим фактором, оказывающим лимитирующее влияние на радиальный прирост сосны обыкновенной на Южном Урале, являются атмосферные осадки весенне-летнего периода. Наиболее тесная связь для радиального прироста сосны на Южном Урале найдена с атмосферными осадками мая-июля ($r = 0,60-0,78$). Благодаря большой длительности реконструированных рядов осадков найдены статистически значимые когерентности для низкочастотных осцилляций с периодом в 22 года (САК) и 50 лет (САК и АМК).
4. С помощью метода главных компонент выявлена и исследована пространственная структура основных гидрометеорологических величин на Южном Урале. Установлено, что на долю первых четырех ЕОС приходится 99% всей изменчивости. ЕОС-1 зимнего периода является ведущей модой изменчивости температуры и осадков, на долю которой приходится основной вклад (82%), и установлено, что она хорошо коррелирует с индексами САК и АО. Выявлена значительная положительная корреляция (0,51-0,73) ЕОС-1 летних месяцев с индексами АМК и Sea Ice Index Anomaly. Анализ инструментальных данных приповерхностной температуры воздуха и модели общей циркуляции атмосферы ECHAM5 позволил получить количественные оценки вклада естественной долгопериодной изменчивости. Полученные результаты свидетельствуют о том, что около 50% современного потепления на Южном Урале связано с естественной климатической изменчивостью.
5. В работе показано, что за последние 50 лет на территории Южного Урала число засух в июле и за летний сезон увеличилось в два раза. При анализе всех четырех индексов засушливости отчетливо установлены случаи экстремальных засух в 1975 и 2010 гг. На основе выявленной пространственной структуры индексов засухи на территории Южного Урала выделены переувлажненные области (горнолесная и некоторые части лесостепной зон) и засушливые районы (большая часть лесостепной зоны, степной зоны и Зауралья).

6. Выявлено совпадение экстремальных значений индексов пожарной опасности с наиболее засушливыми периодами: июнь 1995 г., июнь-август 2010 г., июнь-июль 2020 г. Сопоставление данных с высокими значениями индексов ПО со снимками спутника Terra-MODIS для территории Южного Урала показало совпадение экстремальных значений индексов ПО с датами фактических пожаров.

7. Установлено, что за последние годы на фоне глобального потепления, в крупных промышленных центрах Южного Урала, прежде всего в Уфе, формируются специфические метеорологические условия, способствующие повышению концентрации загрязняющих веществ в атмосфере.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В отечественных изданиях из перечня Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации (ВАК РФ), которые входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования:

[1] Vasil'ev D.Yu., Lukmanov R.L., Ferapontov Yu.I., Chuvyrov A.N. Periodicity in the hydrometeorological parameters of Bashkiria // *Doklady Earth Sciences*. 2013. V. 448. P. 1. PP. 131-134. DOI: 10.1134/S1028334X12110165

[2] Васильев Д.Ю., Гавра Н.К., Кочеткова Е.С., Ферапонтов Ю.И. Корреляции сумм атмосферных осадков со средними и максимальными расходами воды весеннего половодья в бассейне реки Белая // *Метеорология и Гидрология*. 2013. № 5. С. 79-90.

[3] Васильев Д.Ю., Ферапонтов Ю.И. Тренды в колебаниях приземной температуры воздуха на примере Башкирии // *Известия РАН Серия Географическая*. 2015. № 1. С. 77-86.

[4] Кучеров С.Е., Васильев Д.Ю., Мулдашев А.А. Реконструкция осадков мая-июня по радиальному приросту сосны обыкновенной на Бугульминско-Белебеевской возвышенности для территории Башкирии // *Экология*. 2016. № 2. С. 83-93.

[5] Васильев Д.Ю., Кучеров С.Е., Лазарев В.В. Взаимосвязь солнечной активности, климатических индексов и осадков мая-июля, реконструированных на основе анализа радиального прироста лиственницы на Южном Урале // *Оптика Атмосферы и Океана*. 2016. Т. 29. № 3. С. 224-231.

[6] Vasil'ev D.Yu., Sivohip J.T., Chibilev A.A. Climate dynamics and interdecadal discharge fluctuations in the Ural River basin // *Doklady Earth Sciences*. 2016. V. 469. P. 1. PP. 710-715. DOI: 10.1134/S1028334X16070096

[7] Васильев Д.Ю., Бабков О.К., Кочеткова Е.С., Семенов В.А. Вейвлет и кросс-вейвлет анализ сумм атмосферных осадков и приповерхностной температуры на Европейской территории России // *Известия РАН – Серия Географическая*. 2017. № 6. С. 63-77.

[8] Vasil'ev D.Yu., Pavleychik V.M., Semenov V.A., Sivohip J.T., Chibilev A.A. Long-term pattern of temperature and precipitation in the Southern Urals // *Doklady Earth Sciences*. 2018. V. 478. P. 2. PP. 245-249. DOI: 10.1134/S1028334X18020186

[9] Васильев Д.Ю., Бабков О.К., Давлиев И.Р., Семенов В.А., Христовуло О.И. Пространственно-временная структура колебаний приземной температуры на Южном Урале // *Оптика Атмосферы и Океана*. 2018. Т. 31. № 4. С. 294-302.

[10] Васильев Д.Ю., Великанов Н.В., Водопьянов В.В., Красногорская Н.Н., Семенов В.А., Христовуло О.И. Связь аномалий яркостной температуры нижней тропосферы с климатическими индексами на примере Южного Урала // *Исследование Земли из Космоса*. 2019. № 2. С. 14-28.

[11] Vasil'ev D.Yu., Vodopyanov V.V., Zayzeva G.S., Zakirzyanov Sh.I., Semenov V.A., Sivokhip Zh.T., Chibilev A.A. A long term forecast model of spring runoff: the case of the Belaya River // *Doklady Earth Sciences*. 2019. V. 486. P. 2. PP. 724-727. DOI: 10.1134/S1028334X19060345

[12] Vasil'ev D.Yu., Kucherov S.E., Semenov V.A., Chibilev A.A. Reconstruction of precipitation by radial growth of Scots pine in the Southern Urals // *Doklady Earth Sciences*. 2020. V. 490. P. 1. PP.

31-35. DOI: 10.1134/S1028334X20010110

[13] Васильев Д.Ю., Водопьянов В.В., Закирзянов Ш.И., Кенжебаева А.Ж., Семенов В.А., Сивохиц Ж.Т. Корреляционные связи многолетних колебаний месячного и годового стока в бассейне реки Урал // *Известия РАН – Серия Географическая*. 2020. Т. 84. № 3. С. 414-426.

[14] Vasil'ev D.Yu., Vodopyanov V.V., Semenov V.A., Chibilev A.A. Analysis of trends in aridity changes for Southern Ural region over the period 1960-2019 using various methods // *Doklady Earth Sciences*. 2020. V. 494. P. 1. PP. 748-752. DOI: 10.1134/S1028334X20090214

[15] Васильев Д.Ю., Кучеров С.Е., Семенов В.А., Чибилев А.А. Оценка метеорологических факторов пожарной опасности на территории Южного Урала // *География и Природные Ресурсы*. 2022. Т. 43. № 2. С. 161-168. DOI: 10.15372/GIPR20220217

[16] Васильев Д.Ю., Воронова Ю.Г., Новиков С.В., Семенов В.А., Чибилев А.А. Оценка социально-экономических последствий опасных природных явлений на примере Башкирии // *Геоэкология. Инженерная Геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2022. № 4. С. 75-80. DOI: 10.31857/S0869780922040075

[17] Vasil'ev D.Yu., Velmovsky P.V., Semenova G.N., Chibilev A.A. Urban heat island in boundary layer of the atmosphere and ambient air pollution over city of Ufa in 2021 // *Doklady Earth Sciences*. 2022. V. 507. P. 2. PP. 1154-1159. DOI: 10.1134/S1028334X2260075X

[18] Васильев Д.Ю., Вельмовский П.В., Семенов В.А., Семенова Г.Н., Чибилев А.А. Влияние метеорологических условий на уровень загрязнения атмосферного воздуха в городе Уфе // *Оптика атмосферы и океана*. 2023. Т. 36. № 1. С. 49-58. DOI: 10.15372/AOO20230107

[19] Васильев Д.Ю., Семенов В.А., Чибилев А.А. Климатические изменения температурного режима на территории России в XX – начале XXI веков // *География и Природные Ресурсы*. 2023. № 2. С. 15-23. DOI: 10.15372/GIPR20230202

В изданиях из базы данных мировых индексов цитирования «Scopus» и «Web of Science»:

[20] Vasil'ev D.Y., Semenov V.A., Kochetkova E.S., Vodopyanov V.V. Regional structure of surface air temperature fluctuations on the Southern Urals // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. «24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». Tomsk. 2018. V. 10833. P. 1083391-5. DOI:10.1117/12.2505862

[21] Vasil'ev D.Y., Semenov V.A., Vodopyanov V.V. Climatic changes on the Southern Urals // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. «25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». Novosibirsk. 2019. V. 11208. P. 112086-R. DOI: 10.1117/12.2539064

[22] Vasil'ev D.Y., Semenov V.A., Kochetkova E.S., Vodopyanov V.V., Velikanov N.V., Yelizariyev A.N. Atmospheric circulation internal variability contribution and global climate change // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. «26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». Moscow. 2020. V. 11560. P. 115605-Y. DOI: 10.1117/12.2574452

[23] Vasil'ev D.Y., Semenov V.A., Kucherov S.E. Precipitation reconstruction of the spring-summer precipitation on the Southern Urals // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Moscow. 2020. V. 606: 012064. DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012064

[24] Vasil'ev D.Y., Chibilev A.A. Temporal variabilities and correlation of runoff in the Ural River // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Orenburg. 2021. V. 817: 012111. DOI: 10.1088/1755-1315/817/1/012111

[25] Vasil'ev D.Y., Gavra N.K., Yelizariyev A.N., Kochetkova E.S., Chibilev A.A. Near-surface air temperature and precipitation variability over the period 1936-2019 (a case study of Bashkiria) // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. «27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». Moscow. 2021. V. 11916. P. 119164W-5. DOI: 10.1117/12.2601832

[26] Vasil'ev D.Y., Yelizariyev A.N., Denmukhamadiva A.I., Mulina A.V., Christodulo O.I., Chibilev A.A. Seasonal variability of surface atmospheric pressure over the territory of Russia for 1950-2021 //

Программные продукты и базы данных, зарегистрированные в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатент):

[27] Васильев Д.Ю., Водопьянов В.В. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661032*: «Вычисление параметров линейного тренда и оценка их статистической значимости, на примере гидрометеорологических характеристик». Заявка № 2018618791. Дата поступления 17 августа 2018 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 31 августа 2018 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[28] Васильев Д.Ю., Водопьянов В.В. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661343*: «Расчет пространственно-корреляционной матрицы гидрометеорологических параметров». Заявка № 2018618842. Дата поступления 17 августа 2018 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06 сентября 2018 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[29] Васильев Д.Ю., Водопьянов В.В. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661344*: «Реализация метода вейвлет-преобразования гидрометеорологических величин». Заявка № 2018618840. Дата поступления 17 августа 2018 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06 сентября 2018 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[30] Васильев Д.Ю., Водопьянов В.В., Закирзянов Ш.И., Зайцева Г.С. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661697*: «Реализация модели долгосрочного прогноза весеннего стока равнинной реки». Заявка № 2018618789. Дата поступления 17 августа 2018 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12 сентября 2018 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[31] Васильев Д.Ю., Водопьянов В.В. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661797*: «Реализация метода разностно-интегральных кривых, на примере стока реки». Заявка № 2018618834. Дата поступления 17 августа 2018 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18 сентября 2018 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[32] Васильев Д.Ю., Водопьянов В.В., Закирзянов Ш.И. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661796*: «Реализация модели периодически коррелируемого случайного процесса на примере стока реки». Заявка № 2018618838. Дата поступления 17 августа 2018 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18 сентября 2018 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[33] Васильев Д.Ю., Водопьянов В.В., Закирзянов Ш.И. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019618290*: «Реализация метода пространственной интерполяции гидрометеорологических величин». Заявка № 2019617124. Дата поступления 18 июня 2019 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27 июня 2019 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[34] Акперов М.Г., Бабков В.А., Васильев Д.Ю., Семенов В.А. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019660282*. «Реализация метода разложения гидрометеорологических полей на естественно-ортогональные составляющие». Заявка № 2019619186. Дата поступления 24 июля 2019 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 5 августа 2019 г. Правообладатель: Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

[35] Васильев Д.Ю., Водопьянов В.В., Костецкий А.К., Семенов В.А. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615645*: «Обработка гидрометеорологической информации формата NetCDF». Заявка № 2020612733. Дата

поступления 10 марта 2020 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27 мая 2020 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[36] Васильев Д.Ю., Водопьянов В.В., Костецкий А.К., Семенов В.А. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616448*: «Статистический анализ климатических изменений по индексам засушливости». Заявка № 2020615528. Дата поступления 02 июня 2020 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17 июня 2020 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[37] Васильев Д.Ю., Водопьянов В.В., Костецкий А.К., Семенов В.А. *Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020620991*: «Двумерные массивы индексов засушливости для территории Южного Урала». Заявка № 2020620866. Дата поступления 02 июня 2020 г. Зарегистрировано в Реестре баз данных 17 июня 2020 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[38] Васильев Д.Ю., Водопьянов В.В., Габбасов К.Р., Семенов В.А., Шабанов Д.В. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616486*: «Реализация статистической модели температуры воздуха и атмосферных осадков». Заявка № 2020615565. Дата поступления 02 июня 2020 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18 июня 2020 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[39] Васильев Д.Ю., Аксенов С.Г., Кучеров С.Е., Семенов В.А., Чибилев А.А., Шабанов Д.В. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020661854*: «Реализация методов расчета индексов пожарной опасности». Заявка № 2020660790. Дата поступления 21 сентября 2020 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 01 октября 2020 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[40] Васильев Д.Ю., Аксенов С.Г., Кучеров С.Е., Семенов В.А., Чибилев А.А., Шабанов Д.В. *Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020622541*: «Двумерные массивы индексов пожарной опасности для территории Южного Урала». Заявка № 2020622473. Дата поступления 30 ноября 2020 г. Зарегистрировано в Реестре баз данных 8 декабря 2020 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[41] Васильев Д.Ю., Картак В.М., Гусев Н.А., Вульфин А.М., Семенов В.А., Чибилев А.А. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619350*: «Программный модуль для вычисления основных климатических показателей». Заявка № 2021618572. Дата поступления 1 июня 2021 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08 июня 2021 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[42] Васильев Д.Ю., Картак В.М., Гусев Н.А., Вульфин А.М., Семенов В.А., Чибилев А.А. *Свидетельство о государственной регистрации базы данных №: 2021621271* «Матрицы основных климатических показателей». Заявка № 2021621119. Дата поступления 1 июня 2021 г. Зарегистрировано в Реестре баз данных 15 июня 2021 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[43] Васильев Д.Ю., Картак В.М., Денмухаммадиева А.И., Мулина А.В., Семенов В.А., Чибилев А.А. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663027*: «Программный модуль для оценки социально-экономических последствий от опасных природных процессов». Заявка № 2021662121. Дата поступления 30 июля 2021 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11 августа 2021 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[44] Васильев Д.Ю., Воронова Ю.Г., Новиков С.В., Семенов В.А. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613121*: «Программный модуль по оценке на однородность и стационарность рядов экспериментальных данных и наблюдений». Заявка № 2022611492. Дата поступления 4 февраля 2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 01 марта 2022 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[45] Васильев Д.Ю., Воронова Ю.Г., Новиков С.В., Семенов В.А. *Свидетельство о*

государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613122: «Программный модуль по прогнозу опасных природных явлений». Заявка № 2022611491. Дата поступления 4 февраля 2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 01 марта 2022 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[46] Васильев Д.Ю., Великанов Н.В., Гилязов Р.И., Семенов В.А. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022614179*: «Программный модуль для анализа температурных аномалий по данным спутниковых наблюдений». Заявка № 2022613432. Дата поступления 10 марта 2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17 марта 2022 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[47] Васильев Д.Ю., Бикмеев А.Т., Галимуллин Д.Ф., Кучеров С.Е., Миначов Ш.М., Пчелинцев Д.А. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022614469*: «Программный модуль по обработке и анализу дендрохронологических измерений». Заявка № 2022613415. Дата поступления 10 марта 2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22 марта 2022 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

[48] Васильев Д.Ю., Воронова Ю.Г., Семенов В.А. *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619483*: «Программный модуль для расчета и построения кривых обеспеченностей по данным гидрометеорологических измерений». Заявка № 2022618942. Дата поступления 5 мая 2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23 мая 2022 г. Правообладатель: Уфимский государственный авиационный технический университет.

Учебные пособия:

[49] Васильев Д.Ю., Красногорская Н.Н. Физико-географические основы природной среды. *Учебное пособие в 2 частях. Часть I. Атмосфера*. 2018. Уфа: Редакционно-издательский комплекс Уфимского государственного авиационного технического университета. 84 с. ISBN: 978-5-4221-1178-7;

Васильев Д.Ю., Красногорская Н.Н. Физико-географические основы природной среды. *Учебное пособие в 2 частях. Часть II. Гидросфера. Литосфера*. 2019. Уфа: Редакционно-издательский комплекс Уфимского государственного авиационного технического университета. 82 с. ISBN: 978-5-4221-1178-4

[50] Васильев Д.Ю., Елизарьев А.Н. Физико-географическое районирование. *Учебное пособие*. 2020. Уфа: Редакционно-издательский комплекс Уфимского государственного авиационного технического университета. 83 с. ISBN: 978-5-4221-1364-4

[51] Васильев Д.Ю., Елизарьев А.Н. Физические аспекты опасных природных явлений. *Учебное пособие*. 2021. Уфа: Редакционно-издательский комплекс Уфимского государственного авиационного технического университета. 80 с. ISBN: 978-5-4221-1509-9

Список цитируемой литературы:

[1] Агафонов Л.И., Гурская М.А. Влияние стока нижней Оби на радиальный прирост деревьев // *Лесоведение*. 2010. № 4. С. 9-18.

[2] Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С. и др. Экстремальные гидрологические ситуации. М.: Медиа-Пресс. 2010. 464 с.

[3] Кучеров С.Е. Реконструкция летних осадков на Южном Урале за последние 375 лет на основе анализа радиального прироста лиственницы Сукачева // *Экология*. 2010. № 4. С. 248-256.

[4] Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: ИВП РАН. 2018. 300 с.

[5] Попов Е.Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 394 с.

- [6] Семенов В.А., Алешина М.А., Оценка прямого радиационного воздействия в изменения приземной температуры в современный период // *Доклады РАН. Науки о Земле*. 2021. Т. 497. № 2. С. 155-160.
- [7] Сонькин Л.Р. Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 223 с.
- [8] Bai K., Li K., Guo J., Cheng W., Xu X. Do more frequent temperature inversions aggravate haze pollution in China // *Journal of Geophysical Research*. 2022. V. 49. No 4. PP. 1-10. DOI: 10.1029/2021GL096458
- [9] Friedman, J.H., 1984. A Variable Span Smoother. Tech. Rep. N 5. Dept. of Statistics. Stanford University.
- [10] Meko D., Panyushkina I., Edwards J., Agafonov L. Impacts of high flows of an Arctic river on ring widths of floodplain trees // *The Holocene*. 2020. V. 30. No 6. PP. 789-798. DOI: 10.1177/0959683620902217
- [11] Yang J., Shao M. Impacts of extreme air pollution meteorology on air quality in China // *Journal of Geophysical Research*. 2021. V. 126. No 7. PP. 1-10. DOI: 10.1029/2020JD033210

Васильев Денис Юрьевич

**ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ЮЖНОМ УРАЛЕ:
ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ**

Специальность 1.6.18. – Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Подписано в печать 2023 г. Формат 60 x 84 1/16.

Печ. л. 2. Тираж 200 экз. Заказ №

*Редакционно-издательский центр
Уфимского университета науки и технологий
Отпечатано в отделе полиграфии
Редакционно-издательского центра
450008, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12*