

На правах рукописи



ТИТКОВА ТАТЬЯНА БОРИСОВНА

**ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛО-ВЛАГООБМЕНА И ХАРАКТЕРИСТИК
ПОВЕРХНОСТИ РАВНИННЫХ ТЕРРИТОРИЙ РОССИИ В ПЕРВОЙ
ЧЕТВЕРТИ XXI ВЕКА**

Специальность 1.6.18. — Науки об атмосфере и климате

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора географических наук

Москва — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт географии Российской академии наук»

Научный консультант: **Золотокрылин Александр Николаевич**, доктор географических наук, профессор РАН

Официальные оппоненты: **Переведенцев Юрий Петрович**, д.г.н., профессор РАН, главный научный сотрудник Казанского Государственного Университета / Институт экологии, биотехнологии и природопользования / Отделение природопользования / Кафедра метеорологии, климатологии и экологии атмосферы

Репина Ирина Анатольевна д.ф.-м.н., профессор РАН, главный научный сотрудник Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН / зав. лабораторией взаимодействия атмосферы и океана

Лобанов Владимир Алексеевич, д.т.н., старший научный сотрудник, профессор Российского государственного гидрометеорологического университета / Кафедра метеорологии и климатологии

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «**Институт природно-технических систем**», г. Севастополь

Защита состоится «11» декабря 2026 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета 24.1.049.03 на базе ФГБУН «Институт географии Российской академии наук» по адресу: 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии РАН по адресу: 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29 и на сайте Института: <http://igras.ru/defences>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Отзывы на автореферат (на бумажных носителях в одном экземпляре, заверенные подписью и печатью, и в электронном виде в формате PDF) просим направлять по адресу 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29, и.о. учёному секретарю Диссертационного совета 24.1.049.03, Черенковой Е.А.; email: d00204604@igras.ru

и.о. учёного секретаря диссертационного совета,

доктор географических наук



Черенкова Е.А.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы

Понимание климатических взаимодействий в системе «атмосфера – подстилающая поверхность» фундаментально для прогноза состояния природной среды. Эти взаимодействия активно трансформируются под влиянием глобального потепления, заметно усилившегося с конца 1970-х годов (Груза, Ранькова, 2012; Переведенцев и др., 2019; IPCC, 2021). Потепление климата воздействует на температуру, режим осадков, тепло-влагообмен и свойства поверхности и пространственно-временные контрасты ключевых климатических параметров (Золотокрылин и др., 2007; Виноградова, Титкова, 2024; Мячина и др., 2022; Семенов, Алешина, 2021; Barriopedro et al., 2006; IPCC, 2021; Tabari, 2021; Krivoguz, 2025; Marshall, 2021; Vu et al., 2024).

В системе «атмосфера – подстилающая поверхность» особую роль играют нерадиационные турбулентные потоки явного и скрытого тепла. Они являются фундаментальным механизмом тепло-влагообмена, напрямую определяя состояние и функционирование экосистем (Мохов, 2022; Ольчев и др., 2017; Репина, 2023; Trenberth et al., 2009). Поток явного тепла формирует тепловой режим приземного воздуха, а поток скрытого тепла служит прямым индикатором влагообмена экосистемы. Вместе они составляют доминирующую часть нерадиационного энергетического баланса, выступая количественной мерой жизнедеятельности и изменчивости ландшафтов, определяя их продуктивность. Изменения этих потоков могут иметь серьёзные последствия для экосистем и человека (Герасимов, 1985; Голицын Г.С., 2019; Прищепов и др., 2021; Репина и др., 2024; Tchebakova et al., 2022).

Основные механизмы климатического взаимодействия в системе «атмосфера – подстилающая поверхность» изучены достаточно глубоко и отражены в работах многих исследователей (Базилевич и др., 1986; Кислов, 2001; Кондратьев, 2004; Переведенцев и др., 2017; Шмакин, 2006; Gray et al., 2010; Jones et al., 1986 и др.). Накоплен значительный объём знаний о влиянии глобального потепления на климатическую систему (Второй..., 2014; Груздев, Лобанов, 2025; Мохов, 1993; Семенов, 2012; Третий..., 2022; Williams et al., 2007). Исследовались частные вопросы изменения температуры, осадков, баланса тепло-влагообмена, а также поглощательная и отражательная способности поверхности в природных зонах (Анисимов и др., 2011; Белоновская и др., 2016; Кренке, Золотокрылин, 1984; Лупян и др., 2007; Wen et al., 2011 и др.). Было установлено, что характер связи климата и растительности не универсален и зависит от зональных, экосистемных и антропогенных факторов (Defriez, Reuman, 2017; Eisfelder et al., 2025; Shi et al., 2025). Существует понимание концепции критических переходов, когда экосистемы способны долгое время сопротивляться изменениям, но могут резко переходить в новое состояние при достижении пороговых условий (Moss et al., 2024; Osland et al., 2025).

При этом большинство современных работ, посвящённых исследованию изменения климата, сосредоточены либо на анализе трендов отдельных показателей (Wu et al., 2023; Eisfelder et al., 2025 и др.), либо на выявлении статистических связей между ними (Lawal et al., 2021; Mehmood et al., 2024; Petropoulos, Lekka, 2024 и др.). Комплексные процессы, характеризующие климатическую изменчивость и продуктивность системы «атмосфера – подстилающая поверхность», включая синхронность изменений режимов нерадиационного турбулентного обмена, а также поглощательной и отражательной способностей подстилающей поверхности, остаются малоизученными (Fisher et al., 2020; May et al., 2020; Chen et al., 2016; Malhi et al., 2021; Hultgren et al., 2025 и др.). Понимание климатической динамики этих изменений в природных зонах позволит прогнозировать как негативные, так и потенциально благоприятные последствия для природных систем и человека.

Актуальность исследования

Актуальность исследования изменений турбулентного тепло-влагообмена и поглощательной и отражательной способности подстилающей поверхности, включая такие характеристики, как альbedo, радиационная температура и вегетационный индекс, на равнинах России (Восточно-Европейской и Западно-Сибирской) в первой четверти XXI века обусловлена решением фундаментальных и прикладных задач.

Научно-методологический аспект заключается в комплексной количественной оценке климатической изменчивости с учётом турбулентных потоков тепло-влагообмена и характеристик поверхности в тёплый период вдоль широтного профиля двух макрорегионов, что позволяет выявить универсальные и региональные закономерности.

Экологический фактор входит в актуальность тем, что чувствительность экосистем к климату может как усиливать, так и смягчать климатические колебания в зависимости от природной зоны. Трансформация климата влияет на турбулентные потоки тепла, альbedo, радиационную температуру и вегетационный индекс, что ослабляет или усиливает связи в климатической системе. Эти процессы требуют количественной оценки.

Социально-экономический фактор заключается в том, что оценка продуктивности агро- и экосистем, прогнозирование урожайности напрямую зависят от учёта потоков тепла и влаги, а данные дистанционного зондирования являются основой мониторинга состояния посевов и лесов.

Таким образом, актуальность исследования связана с необходимостью расширить фундаментальные знания о комплексной климатической изменчивости системы «атмосфера – подстилающая поверхность» в вегетационный период, включая режимы нерадиационного турбулентного обмена (потоков явного и скрытого тепла) и поглощательной и отражательной способности подстилающей поверхности (альbedo, радиационной температуры, вегетационного индекса), что необходимо для оценки последствий современного изменения климата с учётом зональной специфики природных территорий.

Цель

Выявить закономерности комплексной изменчивости климатических характеристик, параметров турбулентного тепло-влагообмена, а также отражательных и поглощательных свойств подстилающей поверхности в пределах природных зон равнинной территории России в тёплый период первой четверти XXI века. Обосновать методику дешифрирования ареалов с деградированной растительностью природного и антропогенного происхождения с использованием данных дистанционного зондирования Земли.

Задачи исследования

1. Получить количественные оценки изменений климатических режимов природных зон равнин России в первой четверти XXI века по сравнению со второй половиной XX века.
2. Установить изменение пространственной структуры турбулентного тепло-влагообмена тёплого периода с выделением и количественным описанием региональных энергоактивных зон равнин России.
3. Оценить влияние приповерхностной температуры воздуха, температуры поверхности океана, а также общей циркуляции атмосферы на изменчивость турбулентного тепло-влагообмена тёплого периода в природных зонах равнин России.

4. Получить количественные оценки альbedo поверхности, радиационной температуры, вегетационного индекса и их изменения и исследовать их связь с турбулентным тепло-влажнообменом в природных зонах равнин России.

5. Обосновать методику дешифрирования ареалов с деградированной растительностью природного и антропогенного происхождения на основе определения типа терморегуляции поверхности с использованием данных дистанционного зондирования Земли.

6. Выявить изменчивость переходных климатических зон в тёплый период.

Объект исследования

Климатическая изменчивость природных зон равнин России.

Предмет защиты

Предметом защиты является решение крупной научной проблемы – комплексное определение закономерностей пространственно-временной климатической изменчивости природных зон равнин России, включая турбулентный тепло-влажнообмен, а также отражательные и поглощательные свойства поверхности, в тёплый период первой четверти XXI века. Обоснование методики дешифрирования ареалов с деградированной растительностью по данным дистанционного зондирования Земли.

Положения, выносимые на защиту

1. Из-за роста температуры и разнонаправленности трендов осадков климатические режимы в южных секторах природных зон (от тундры до сухой степи) в первой четверти XXI века вышли за границы климатической нормы и демонстрируют значения, типичные для более южных ландшафтов, что указывает на климатическую трансформацию природных зон равнин России.

2. Изменение турбулентного тепло-влажнообмена тёплого периода в современный период (1991-2020 гг. относительно 1961-1990 гг.) проявилось статистически значимым усилением потоков явного тепла с максимумом до 17% в суббореальной зоне, значимым ростом потока скрытого тепла в субарктике и бореальной зоне до 10% и его тенденцией к снижению в суббореальной зоне до -6%. Бореальные леса и сухие степи выделяются как региональные зоны высокой пространственной контрастности тепло-влажнообмена до 1 МДж на 1° широты и долготы.

3. Общий вклад колебаний приповерхностной температуры воздуха, температуры поверхности океана, общей циркуляции атмосферы в изменчивость тепло-влажнообмена достигает в субарктике 90%, в бореальной зоне 40% и в суббореальной 60%. Приповерхностная температура выступает наиболее информативным предиктором этой изменчивости во всех зонах.

4. Природные зоны различаются диапазонами и характером статистических связей между альbedo поверхности, радиационной температурой, вегетационным индексом, которые в свою очередь значимо взаимосвязаны с турбулентным тепло-влажнообменом в пространственном диапазоне от подтаёжной зоны до полупустыни.

5. Ареалы с радиационным типом терморегуляции выделяются по обратной связи между альbedo поверхности и радиационной температурой, служат индикаторами деградации поверхности вследствие климатических флуктуаций и антропогенной нагрузки.

6. Наиболее стабильными индикаторами квазистационарных зонально-климатических рубежей (зон максимальной контрастности климатических характеристик) в Большеземельской тундре, в зоне средней тайги Западной Сибири и в сухостепной зоне ЕТР являются горизонтальные градиенты потоков явного и скрытого тепла, вегетационный индекс и эвапотранспирация.

Научная новизна

Научная новизна заключается в том, что впервые:

1. Проведена комплексная оценка диапазонов климатических параметров в природных зонах равнин России в первой четверти XXI века относительно второй половины XX века и выявлены статистически значимые изменения климатических условий природных зон.

2. Описано изменение пространственно-временной структуры турбулентного тепло-влагообмена тёплого периода в субарктической, бореальной и суббореальной зонах равнин России в первой четверти XXI века, характеризующее отклик на современные климатические изменения. Выделены региональные энергоактивные природные зоны, являющиеся ключевыми регионами воздействия климатических изменений на продуктивность экосистем.

3. Оценено влияние повышения температуры воздуха и океана, колебаний циркуляции атмосферы, а также контрастности климатических характеристик на Арктическом и Полярном фронтах на региональные процессы тепло-влагообмена на равнинах России.

4. По данным дистанционного зондирования Земли определены диапазоны, характер связи и динамика альбедо поверхности, радиационной температуры и вегетационного индекса как индикаторы климатически обусловленной динамики ландшафтов, что расширяет теоретическую базу ландшафтной климатологии.

5. Предложен и теоретически обоснован метод выявления ареалов с деградированной растительностью природного и антропогенного происхождения по данным дистанционного зондирования Земли на основе определения терморегуляции поверхности, что создаёт объективный инструмент для выявления и оценки динамики очагов деградации поверхности.

6. Определена структура зонально-климатических рубежей на основе летней контрастности климатических параметров, тепло-влагообмена и характеристик поверхности, что даёт основу для отслеживания и прогнозирования смещения климатических границ природных зон на фоне изменения климата.

Научная и практическая значимость

Научная значимость исследования заключается в разработке и реализации комплексного подхода к оценке климатической изменчивости природных зон равнин России, который интегрирует анализ турбулентного тепло-влагообмена, характеристик поверхности и их динамики под влиянием глобального потепления и циркуляционных факторов в первой четверти XXI века. Ключевым результатом стало выявление количественных изменений турбулентных потоков тепло-влагообмена и поглощательных и отражательных свойств подстилающей поверхности, а также их взаимосвязей в природных зонах равнин России. Особую ценность представляет анализ переходных природных зон, выступающих индикаторами климатических изменений.

Прикладное значение результатов определяется методом, разработанным на основе данных дистанционного зондирования Земли. Методика предусматривает выявление

ареалов деградации растительности по типу терморегуляции поверхности независимо от природной зоны и оперативно и объективно определяет деградацию экосистем. Определение диапазонов и сочетаний характеристик подстилающей поверхности в их трансформации под влиянием изменений тепло-влагообмена формирует современный инструмент для эффективного применения спутникового мониторинга для наблюдения за экосистемами.

Таким образом, полученные результаты и разработанный методический аппарат развивают теоретические основы ландшафтной климатологии, расширяя представления о механизмах климатической трансформации природных зон равнин России на фоне глобального роста температуры, что открывает новые возможности для системного контроля и оценки уязвимости экосистем.

Территория

Рассматриваются основные природные зоны (субарктическая, бореальная, суббореальная) равнин Европейской части России и Западной Сибири.

Период исследования

Исследуется вторая половина XX – первая четверть XXI века, что охватывает этап климатической стабильности и фазу интенсивного потепления, начавшуюся в 1970-х годах (Третий..., 2022). Ключевое внимание уделяется оценке климатической изменчивости тёплого периода, когда межширотные различия в поступлении солнечной радиации и условиях увлажнения проявляются наиболее контрастно. Использован подход синхронных наблюдений в пространственном диапазоне от тундры до полупустынь. Это позволило провести межзональное сравнение турбулентного тепло-влагообмена и отражательных и поглощательных свойств поверхности природных зон в фазу активной вегетации. Для субарктической зоны (тундра, тайга) использовались данные за июнь – август, для суббореальной зоны – с апреля по сентябрь. Для ряда характеристик привлекались годовые значения.

Данные и методы исследования

Анализировались данные гидрометеорологических наблюдений Росгидромета, архивы атмосферных реанализов, материалы мониторинга дистанционного зондирования Земли. Интеграция баз данных позволила оценить пространственно-временное изменение климата.

Проведена оценка погрешности турбулентных потоков явного и скрытого тепла на основе реанализа ERA5-Land с данными наблюдений субарктической, бореальной и суббореальной зон всего северного полушария. Был применён широкий спектр методов статистической обработки данных в пакете анализа MATLAB, для которого автором были написаны специальные программы. Количественно оценивались климатические изменения, а также связи между изучаемыми параметрами. Показаны региональные энергоактивные природные зоны. Предложен и теоретически обоснован метод выявления ареалов с деградированной растительностью на основе определения терморегуляции поверхности. Выделены зонально-климатические рубежи на основе максимальной контрастности климатических характеристик.

Результаты, положенные в основу диссертационной работы

Результаты получены в рамках научных программ и проектов: ГЗ № FMWS-2024-0001 (2024/2028); ГЗ № FMGE-2019-0009 (2019/2022); грант Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-554 от 24 апреля 2024 г.); РНФ № 23-27-00047 (2023/2024); РНФ № 16-17-10236 (2016/2020); РГО-а № 17-05-41085

(2017–2019); РФФИ № 17-05-00245 (2017/2019); РФФИ № 17-05-00518 (2017/2019); РФФИ № 18-05-60216 (2018/2020).

Личный вклад автора

Все представленные результаты в диссертации были получены автором лично либо в соавторстве с российскими коллегами А.Н. Золотокрылиным, В.В. Виноградовой, Е.А. Черенковой, А.Ю. Михайловым. В работах, относящихся к выносимым на защиту результатам и выполненным в соавторстве, основная идея исследования принадлежала автору.

Апробация работы

По теме диссертации опубликовано 60 работ (51 в рецензируемых журналах и 9 в монографиях и книгах), входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, определяемых в соответствии с рекомендацией Комиссии (БАК): Journal of Applied Meteorology and Climatology, Journal of Arid Environments, Water Resources, «Метеорология и гидрология», «Известия РАН. Серия географическая», «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», «Фундаментальная и прикладная климатология», «Арктика: экономика и экология», «Аридные экосистемы», «Лёд и Снег», «Исследование Земли из космоса», «Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем», «Криосфера Земли».

Результаты исследования по диссертационной работе были представлены на 40 всероссийских и международных научных конференциях: Международная конференция IRC 2026, Istanbul; Международная конференция «Актуальные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды в условиях изменяющегося климата», 2026 г.; The Egyptian Geographical Society, IGU Egypt 2025; Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 2014–2026 гг.; Конференция «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», 2024 г.; Всероссийская конференция «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования», 2023 г.; II Лавёровские чтения – Арктика: актуальные проблемы и вызовы, 2023 г.; CRYOSPHERE 2022, Reykjavík, Iceland; Конференция «Деградация земель и опустынивание: проблемы устойчивого природопользования и адаптации», 2021 г.; Всероссийская конференция «Климатические изменения и сезонная динамика ландшафтов», Екатеринбург, 2021 г.; 9-й Международный симпозиум «Степи северной Евразии» (степной форум РГО), 2021 г.; XXVI Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», 2020 г.; 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 2020 г.; Всероссийская конференция памяти академика А.М. Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата», 2020 г.; Вторая всероссийская научная конференция «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны», 2020 г.; International online conference «Weather and Climatic Extremes: Data, Analysis and Impact, WCEDAI», 2020 г.; Международная конференция «Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ», 2020 г.; Вторая всероссийская научная конференция «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны», 2020 г.; Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование: MARESEDU-2019»; Международная конференция, посвящённая 50-летию совместной Российско-Монгольской палеонтологической экспедиции и совместной Российско-Монгольской комплексной биологической экспедиции РАН и АНМ, 2019 г.; Международная конференция «Государственное управление и развитие России: национальные цели и институты», 2019 г.; Объединённая конференция: экология, экономика, информатика», 2018 г.; Международная конференция к 100-летию ИГ РАН «Практическая и география и вызовы XXI века», 2018 г.; Восьмой

международный симпозиум «Степи северной Евразии», 2018 г.; «Турбулентность, динамика атмосферы и климата. 100-летие со дня рождения Обухова», 2018 г.; XXIII International symposium, atmospheric and ocean optics, atmospheric physics, 2017 г. Также доклады проводились на научном семинаре лабораторий климатологии и гидрологии ИГ РАН.

Структура и объём работы

Работа состоит из введения, 8 глав, заключения и основных выводов, списка литературы из 465 наименования. В ней содержатся 334 страниц текста, 32 таблицы, 85 рисунков, 2 приложения.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному консультанту, многолетнему вдохновителю – д.г.н., профессору Александру Николаевичу Золотокрылину, чья поддержка на протяжении многих лет вдохновляли на проведение данного исследования. Автор выражает глубокую признательность д.ф.-м.н., академику РАН Владимиру Анатольевичу Семенову за конструктивные замечания, способствовавшие улучшению работы, и за помощь в подготовке диссертации. Автор выражает глубокую благодарность своим постоянным соавторам д.г.н. Елене Анатольевне Черенковой, к.г.н. Вере Владимировне Виноградовой, к.г.н. Валерии Васильевне Поповой, к.г.н. Туркову Дмитрию Владимировичу, к.г.н. Китаеву Льву Михайловичу за многолетнюю плодотворную совместную работу, ценные советы, внимание к работе и содействие на различных этапах исследования. Автор благодарит сотрудников лаборатории климатологии, гидрологии, гляциологии ИГ РАН за доброжелательные советы и содержательные обсуждения результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко приводятся актуальность работы, цель и задачи работы, объект и предмет исследований, положения, выносимые на защиту, научная новизна, научная и практическая значимость, территория и период исследования, используемые данные и методы исследования, результаты, положенные в основу диссертационной работы, личный вклад автора, апробация работы, структура и объём работы, благодарности.

В Главе 1 рассмотрены теоретические аспекты взаимодействия подстилающей поверхности с атмосферой в природных зонах. Обозначены направления современных исследований взаимодействия «подстилающая поверхность — атмосфера».

Ключевым механизмом взаимодействия подстилающей поверхности с атмосферой является радиационный баланс, который определяется разностью между поглощённой коротковолновой солнечной радиацией и эффективным длинноволновым излучением поверхности. Его величина определяется теплоёмкостью, отражательной и поглощательной способностями поверхности. В свою очередь, радиационный баланс уравнивается нерадиационными потоками: турбулентными потоками явного и скрытого тепла, а также тепловым потоком в почву. Согласно глобальным оценкам, основная часть нерадиационных компонентов энергобаланса суши ($\sim 70 \text{ Вт/м}^2$) расходуется именно на турбулентные потоки явного (32 Вт/м^2) и скрытого тепла (38 Вт/м^2) (Wild et al., 2015), тогда как вклад потока тепла в почву и энергии таяния в глобальном масштабе не превышает 1% (Ohmura, 2004). Таким образом, именно турбулентные потоки являются главным каналом отвода энергии от поверхности, что делает их изучение центральной задачей климатологии суши.

Для непосредственного измерения турбулентных потоков на локальном уровне используются наземные сети, в частности FLUXNET, основанные на методе вихревой ковариации (Eddy Covariance). Данный метод получил развитие в конце XX — начале XXI века и позволяет осуществлять высокоточные прямые измерения потоков тепла, влаги и импульса. Однако такие наблюдения ограничены локальным масштабом и географически крайне неравномерны, так как большинство полигонов наземных измерений сосредоточено в Европе и Северной Америке, а обширные территории России, Центральной Азии и Африки остаются слабо охваченными. Это создаёт необходимость в использовании модельных подходов, способных экстраполировать локальные измерения на региональный и глобальный уровни.

В связи с этим в работе приведён обзор моделей турбулентного обмена, которые используют комплексный подход, объединяющий моделирование, наземные данные и материалы дистанционного зондирования Земли. К числу таких моделей относятся SVAT, LSM, SWAP, SPONSOR и другие. Несмотря на разнообразие модельных архитектур, их общим теоретическим базисом служит теория подобия Монина — Обухова, которая описывает структуру турбулентного обмена в приземном слое атмосферы на основе градиентов температуры, влажности и стратификации. Выбор конкретной модели определяется целями исследования, доступными данными и пространственно-временным масштабом решаемой задачи — от точечных расчётов до глобальных климатических симуляций.

Однако модели не могут полностью учесть всё многообразие природных условий, поэтому важную роль играет учёт ландшафтной дифференциации. Рельеф, тип подстилающей поверхности, почвенные характеристики и наличие водных объектов существенно влияют на радиационный баланс и формируют локальный микроклимат. Альbedo регулирует долю поглощённой радиации, шероховатость определяет интенсивность турбулентного переноса, а теплофизические свойства почв и растительности отвечают за аккумуляцию и передачу тепла в систему «поверхность — атмосфера». В этом контексте особого внимания заслуживают региональные энергоактивные зоны суши — территории с высокими градиентами метеопараметров и климатической нестабильностью, где взаимодействие поверхности и атмосферы наиболее интенсивно. Чёткость выделения таких зон зависит от масштаба анализа. На глобальном уровне они могут выглядеть как крупные широтные пояса, тогда как при региональном рассмотрении выявляются более дробные структуры, связанные с орографией и характером землепользования (Johnston, 1992).

Перечисленные физико-географические факторы определяют не только пространственную, но и временную динамику тепло-влагообмена, которая особенно отчётливо проявляется на фоне современных климатических изменений. Показатели глобального потепления в природных зонах Европейской территории России (ЕТР) и Западной Сибири (ЗС) демонстрируют чёткую зональную дифференциацию.

С начала XXI века в высоких широтах темпы роста температуры существенно превышают средне-полушарные значения, что соответствует феномену арктического усиления, тогда как в умеренных и южных широтах они близки к средним по Северному полушарию (рис. 1 I). Рост температуры вызывает каскадные эффекты (рис. 1 II): меняется циркуляция атмосферы, влагосодержание, радиационный обмен, режимы температуры и влажности. Увеличивается поглощение радиации при таянии снега, снижается альbedo (положительная обратная связь). Выбросы парниковых газов из тающей мерзлоты и при пожарах усиливают парниковый эффект. Меняется облачность, усиливается конвективный теплообмен (поток явного тепла). Изменение осадков и влажности влияет на эвапотранспирацию, дефицит почвенной влаги и поток скрытого тепла. Динамика потоков определяется перестройкой общей циркуляции атмосферы во внетропических широтах с

середины XX века. Повышение температуры почвы увеличивает теплопроводность и испарение, меняя круговорот воды, влажность воздуха и распределение осадков по природным зонам. В результате происходит смена условий существования экосистем, которое может выражаться в изменении в отражательных и поглощательных свойствах поверхности.

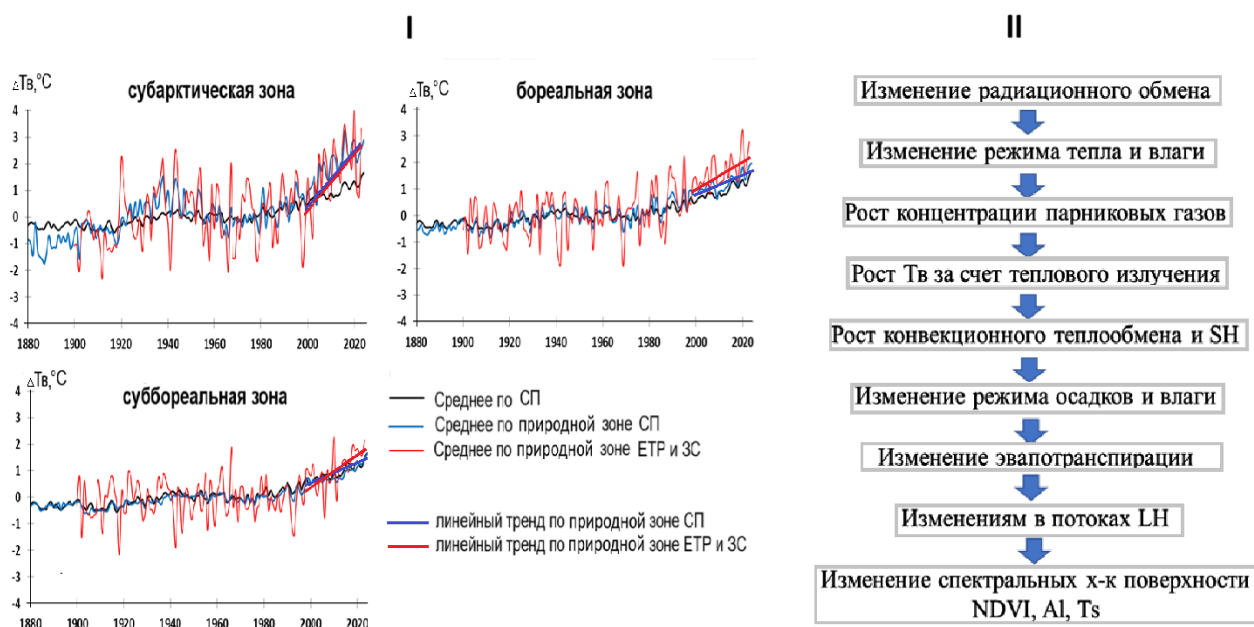


Рис. 1. (I) Средние годовые аномалии региональной приповерхностной температуры воздуха Европейской территории России (ЕТР) и Западной Сибири (ЗС) (данные ВНИИГМИ-МЦД) по сравнению со средней по Северному полушарию (данные NASA) и их линейные тренды за 2000–2024 г. **(II)** Каскадные эффекты в системе «климат — подстилающая поверхность» под влиянием роста температуры воздуха.

В главе 2 приведена характеристика района исследования, данные и методы анализа. Исследования охватили природные зоны ЕТР и Западной Сибири. Для регионов характерна широтная зональность. С севера на юг последовательно сменяются субарктическая (тундра, лесотундра), бореальная (северная, средняя, южная тайга, подтаёжная зона, широколиственные леса, лесостепь) и суббореальная зоны (степь, сухая степь, полупустыня). Сравнение соседних макрорегионов со сходной зональностью, но с региональными особенностями актуально для оценки различных аспектов изменений тепло- и влагообмена в условиях глобального потепления.

Хронологические рамки работы: вторая половина XX — первая четверть XXI века. Конкретные периоды исследования определялись доступностью данных. Период включает этапы относительной климатической стабильности и фазу усиления потепления с середины 1980-х годов (Третий..., 2022).

Использован подход синхронных временных наблюдений климатических параметров, турбулентного тепло-влагообмена, отражательных и поглощательных свойств поверхности в период вегетационной активности ландшафтов, что служит основой для оценки влияния климатических изменений на функционирование экосистем.

Исследуемые климатические характеристики основаны на данных наблюдений (ВНИИГМИ-МЦД, FLUXNET2015), реанализа (Copernicus, NOAA, Hadley Centre, DAAC, UEA CRU, MERRA-2, WATCH) и данных дистанционного зондирования Земли (MODIS). Применялись сравнительно-географические, картографические, геоинформационные и статистические методы исследования. Для обработки массивов данных и их картографирования применялся пакет анализа MATLAB, для которого были написаны программные блоки.

Для оценки климатической устойчивости экосистем от арктических до полупустынных ландшафтов использовались следующие параметры: среднегодовая температура, температура января и июля, сумма активных температур выше 10 °C, годовые осадки, коэффициент увлажнения. Диапазоны показателей для современного периода (2000–2022 гг.) сопоставлены с базовыми, полученными до периода интенсивного потепления и приведёнными в работе (Базилевич и др., 1986). Если более половины средних климатических параметров метеостанции выходили за рамки нормы и попадали в климатические диапазоны другого ландшафта, то влияние климата считалось критическим, и станцию относили к «новой» зоне.

Был применён балансовый метод оценки турбулентного тепло-влагообмена с использованием коэффициента Боуэна (Bo), равному отношению турбулентных потоков явного тепла SH к скрытому теплу LE ($Bo = SH / LE$). При $Bo > 1$ в теплообмене преобладает явное тепло, при $Bo < 1$ — скрытое.

Для оценки контрастности параметров применялся градиентный метод. Под градиентом понимается вектор, характеризующий изменение на единицу расстояния. Шаг по долготе и широте зависит от разрешения исходных данных.

Повторяемость центров циклонов оценивалась по геопотенциальной высоте AT1000 как частота попадания центра в ромбовидную область при условии, что значение в центральной точке ниже, чем в четырёх соседних. Географическое положение арктического и полярного фронтов определялось по зонам максимальных горизонтальных градиентов температуры и повторяемости циклонов с учётом адвекции тепла и фронтогенеза.

Влияние ведущих мод общей циркуляции атмосферы (NAO, AO, PNA, SCAND, EA, EAWR), температуры поверхности океана (ТПО) и температуры воздуха (T_v) на тепло-влагообмен оценено методом множественной регрессии (β -коэффициенты, R^2 , R). Оценка влияния мод SCAND и EAWR на изменение потоков тепло-влагообмена производилась по коэффициенту детерминации с разрешением $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ при пороговом значении $R^2 > 10\%$.

Для идентификации деградации растительности и оголённых участков поверхности по данным дистанционного зондирования Земли использовался коэффициент корреляции Пирсона между альбедо поверхности и радиационной температурой. Отрицательная корреляция указывает на разреженный растительный покров независимо от природной зоны. Величина коэффициента корреляции служит количественным индикатором степени деградации поверхности.

Погрешность турбулентных потоков явного и скрытого тепла реанализа ERA5-Land оценена по сравнению с наземными наблюдениями на полигонах из архива FLUXNET2015. Для этого привлекались все доступные данные по Северному полушарию для летних месяцев в субарктических, бореальных и суббореальных ландшафтах. В целом погрешность турбулентных потоков тепло-влагообмена в базе ERA5-Land составляет около 10% (на отдельных полигонах — до 20%). Наименьшая погрешность (7–8%) отмечена в суббореальной зоне, наибольшая (6–13%) — в субарктической для скрытого тепла. Такой уровень ошибок можно считать приемлемым для использования реанализа ERA5-Land в оценках характеристик турбулентных потоков явного и скрытого тепла и их изменений.

В главе 3 представлены детальные количественные оценки связей и изменений климатических показателей на территориях ЕТР и Западной Сибири. Анализ проводился на уровне отдельных природных зон с комплексной оценкой трансформации климатических условий. Такой подход позволяет сформировать углублённое понимание специфики проявления уровня климатических изменений природных зон равнин России в первой четверти XXI века.

Связи между температурой, осадками, испарением и влажностью почвы образуют сложную систему обратных связей. В летний период в субарктической и бореальной зонах влажность почвы опосредованно связана с весенним снегонакоплением. Длительность влияния снеготаяния варьируется: 1–2 месяца (май — июнь) в засушливых степях, а в лесных районах с близкими грунтовыми водами влияние длится в течение лета (Хорошаев, 2023). В летний период от Арктики до средней тайги действует прямая зависимость: испарение пропорционально температуре (корреляция $+0.6...+0.8$). В зонах широколиственных лесов связь становится резко отрицательной ($-0.6...-0.9$), так как высокая температура иссушает почву и лимитирует испарение. Аналогичный переход наблюдается между температурой воздуха и влажностью почвы: корреляция положительна при избыточном увлажнении в субарктике и на севере бореальной зоны и отрицательна в суббореальной зоне при дефиците влаги. Связь осадков и испарения в субарктических и бореальных зонах слабopоложительна. В регионах с дефицитом летнего увлажнения (от лесостепи до полупустыни) она усиливается до $+0.5...+0.9$, так как испарение лимитируется поступающей влагой. Зависимость влажности почвы от осадков положительна и растёт к югу от подтайжной зоны. Таким образом, ключевым фактором, определяющим испарение и влажность почвы летом, является температура. В арктических и бореальных зонах её влияние положительно, в суббореальных — отрицательно. В суббореальной зоне максимальное положительное влияние на оба параметра оказывают осадки.

Сравнение климатических периодов 1991–2020 гг. и 1961–1990 гг. показывает, что на равнинах России наблюдался положительный тренд летней температуры воздуха (T_v). Наибольшее потепление зафиксировано от широколиственных лесов до полупустынь на ЕТР, а также в тундре, лесотундре, северной тайге Западной Сибири ($1.5\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$) (рис. 2). Во всех природных зонах произошёл рост среднесуточных температур на $2\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и сдвиг летнего максимума на более ранние сроки (до 10–15 дней), а также рост числа дней с экстремальной жарой, особенно на юго-западе и юге ЕТР. Также в начале XXI века изменилась теплообеспеченность вегетации. В субарктических и бореальных ландшафтах зафиксирован рост суммы эффективных температур выше $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на $100\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Начало вегетации сдвинулось на более ранние сроки на 8–12 дней, с максимумом дней в лесотундре и северной тайге. Тенденции изменения летних осадков пространственно неоднородны. В целом наблюдается их уменьшение южнее подтайжной зоны на ЕТР.

Изменение соотношения тепла и влаги отразилось на испарении и влажности почвы. Буфером смены знака изменения испарения в летний период являются широколиственные леса. Так, испарение возрастает севернее этой зоны и снижается южнее. Потепление в сочетании со снижением влагообеспеченности привело к уменьшению влажности почв на юге бореальной зоны и во всей суббореальной зоне ЕТР. Таким образом, наиболее значительные изменения летнего климатического режима произошли в ландшафтах ЕТР от лесостепи до полупустыни, где потепление и сокращение осадков снизили влажность почвы и испарение.

Изменения климатических характеристик в результате глобального потепления могут вести к трансформации самих экосистем. Согласно модельным прогнозам, уже к середине XXI века климатические условия для многих ландшафтов могут перестать соответствовать господствующему типу растительности (Третий..., 2022).

Температура июля в 2000–2022 гг. по сравнению с определённой до интенсивного глобального потепления в период 1960–1980 гг. (Базилевич и др., 1986) в тундре сохраняется в пределах диапазона 1960–1980 гг.; в лесотундре увеличивается в среднем на 0.2–1.7 °С; в северной тайге ЕТР находится у верхней границы диапазона 1960–1980 гг., в Западной Сибири — выше ранее определенного диапазона на 0.8 °С; в средней и южной тайге, подтайге, широколиственных лесах подходит к верхней границе диапазона; в лесостепи находится в его пределах; в полупустыне — устойчиво выше. Суммы активных температур больше 10 °С в тундре на ЕТР соответствуют лесотундре, в лесотундре — северной тайге, а в средней, южной тайге и подтайге превышают фоновые значения. В лесостепи и степи они находятся в пределах нормы, а в полупустыне значительно выше. Зимние температуры сохраняют диапазон изменчивости в пределах нормы. Среднегодовые температуры стали выше нормы в северной тайге и полупустыне.

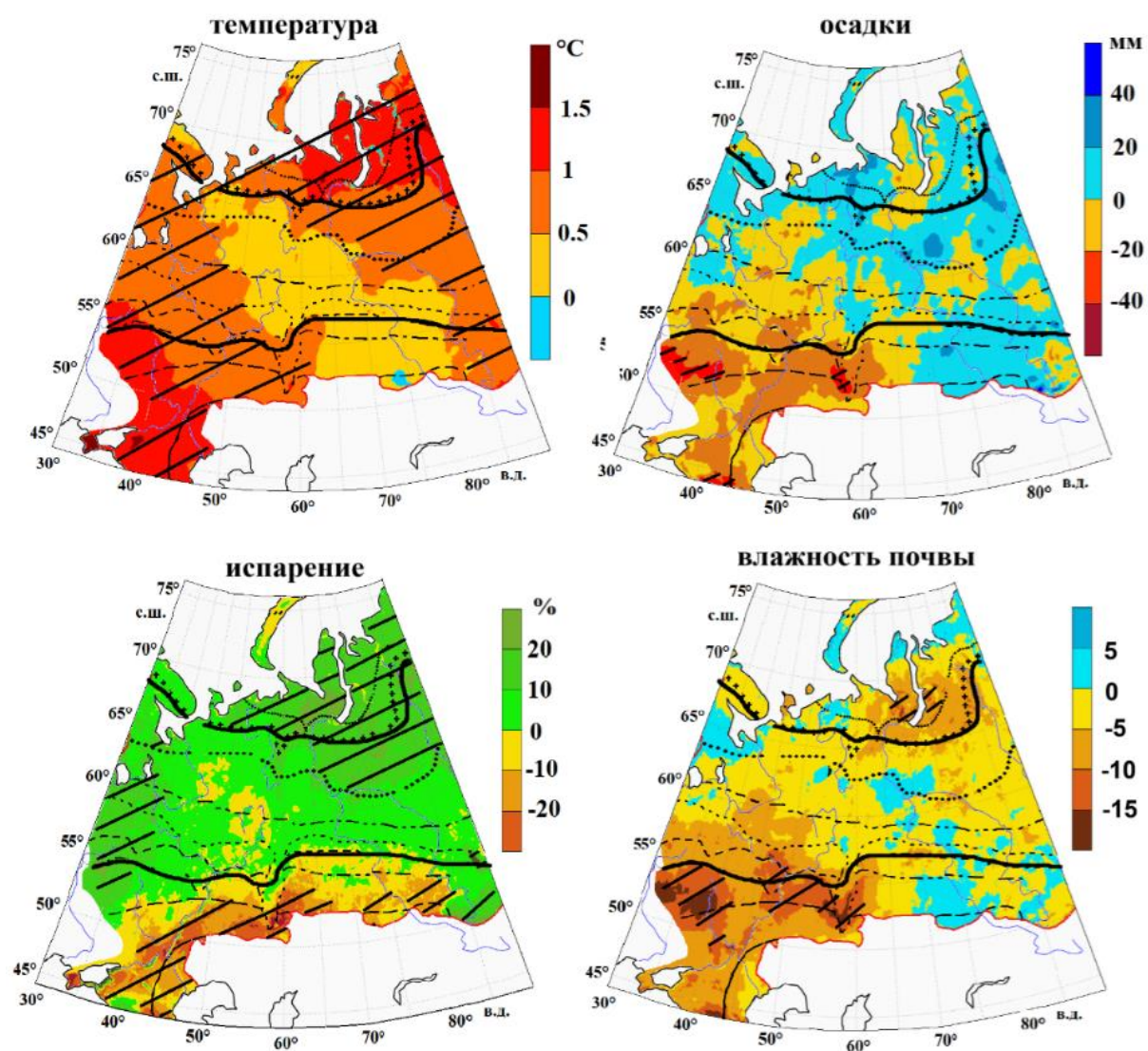


Рис. 2. Изменение климатических параметров между летними периодами (1991–2020) — (1961–1990): температуры воздуха (°C), суммы осадков (мм), испарение (%), влажность верхнего слоя почвы 0–7 см (%) (данные ERA5-Land). Значимые изменения показаны штриховкой. Обозначены границы ландшафтных зон (Национальный атлас..., 2007) (см. рис. 3).

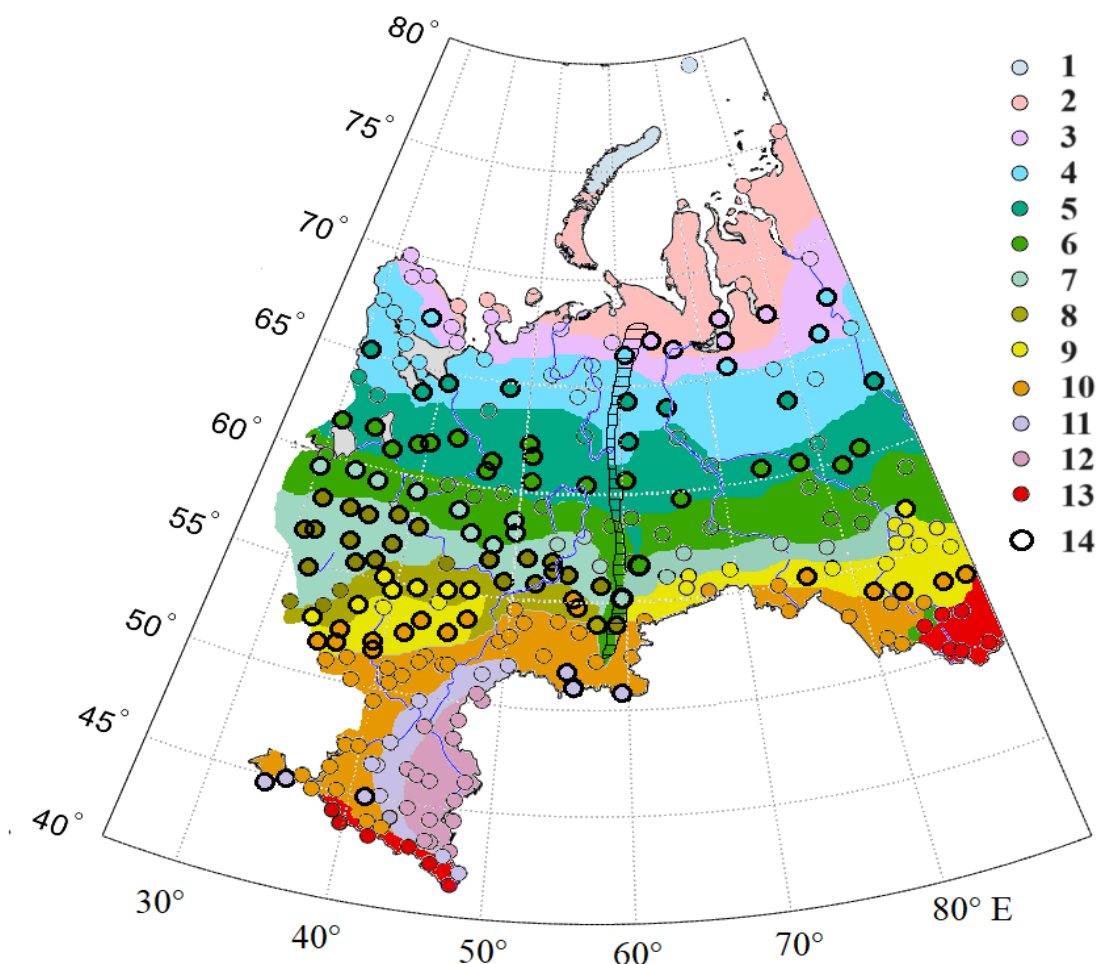


Рис. 3. Климатические условия природных зон в 2000–2020 гг. по метеостанциям. Цвет метеостанции показывает её соответствие природной зоне. Обозначено: 1 — арктические пустыни, 2 — тундра, 3 — лесотундра, 4 — северная тайга, 5 — средняя тайга, 6 — южная тайга, 7 — подтаёжная зона, 8 — широколиственный-лесная, 9 — лесостепь, 10 — степь, 11 — сухая степь, 12 — полупустыня, 13 — высокогорные ландшафты, 14 — климатические показатели природной зоны в 2000–2020 гг. не соответствуют климатическим показателям за 1960–1980 гг. Штриховкой схематично показаны Уральские горы.

Сумма годовых осадков в тундре, лесотундре, северной тайге находится на уровне нижней границы нормы за 1960–1980 гг. или ниже. В средней и южной тайге, подтайге эта тенденция сохраняется. В лесостепи, степи, широколиственных лесах сумма осадков находится в пределах нормы, в полупустыне отмечена у нижней границы нормы. В результате коэффициент увлажнения снизился в тундре и лесотундре до уровня северной тайги, а в других зонах — до нижней границы ранее установленного диапазона. Усиление засушливости наблюдается в восточном направлении.

Летнее потепление и изменение увлажнения в первой четверти XXI века относительно второй половины XX столетия привели к частичному нарушению климатической устойчивости природных зон: смещению температурных параметров и характеристик увлажнения в сторону значений, характерных для более южных ландшафтов, что обусловило трансформацию климатических режимов на равнинах России (рис. 3). Так, в *субарктике* часть метеостанций тундры приближена по климатическим условиям к лесотундре, лесотундры — к северной тайге. Граница лесотундры смещается к северу. В *бореальной* зоне климатические условия северной тайги переходят в

среднетаёжные, а среднетаёжные — в характерные для южной тайги. Часть метеостанций южной тайги ЕТР по климатическим характеристикам ближе к подтаёжной зоне и зоне хвойно-широколиственных лесов. На фоне отрицательных трендов осадков климатические характеристики в части широколиственных лесов приближаются к лесостепи и степи. В суббореальной зоне продолжающийся рост температуры и уменьшение осадков привели к тому, что по климатическим характеристикам фонового периода более двух десятков метеостанций в лесостепи уже соответствуют степной зоне. На юге и юго-востоке ЕТР отрицательные тренды годовых осадков обусловили соответствие климата условиям сухостепной зоны у границы степи и сухой степи. Климатические показатели части метеостанций в сухой степи соответствуют полупустыне, тогда как для нескольких станций условия более характерны для степи.

Таким образом, из-за роста температуры и разнонаправленности трендов осадков климатические режимы в южных секторах природных зон (от тундры до сухой степи) в первой четверти XXI века вышли за границы климатической нормы и демонстрируют значения, типичные для более южных ландшафтов, что указывает на климатическую трансформацию природных зон равнин России.

В главе 4 представлена пространственно-временная структура и баланс летнего тепло-влагообмена природных зон равнин России. Представлены количественные оценки компонентов турбулентного тепло-влагообмена, их изменение и тренды, начиная со второй половины XX века, для двух соседних макрорегионов — ЕТР и Западной Сибири. Выделены региональные энергоактивные природные зоны равнин России.

Энергетические оценки компонентов летнего тепло-влагообмена показали, что в субарктической и бореальной зонах интенсивность турбулентных потоков скрытого тепла в 1.5–2.5 раза больше, чем потоков явного тепла, в то время как в суббореальной зоне больше энергетическая составляющая потоков явного тепла (рис. 4).

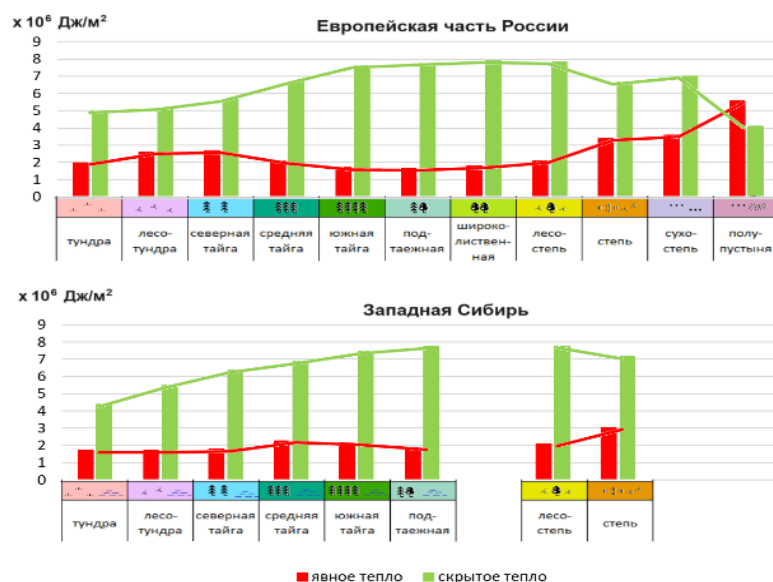


Рис. 4. Энергетическая составляющая летнего потока явного (красным) и скрытого (зелёным) тепла в ландшафтных зонах ЕТР и ЗС за тёплый период 1991–2020 гг. (данные ERA5-Land).

Между летними периодами 1991–2020 и 1961–1990 гг. наблюдается увеличение турбулентных потоков явного тепла во всех природных зонах, в субарктике Западной Сибири на 12% и бореальной зоне на 14%, а на ЕТР в суббореальной зоне на 17%. Турбулентные потоки скрытого тепла выросли в субарктике Западной Сибири на 10%, в бореальной зоне ЕТР и Западной Сибири на 2%, уменьшились в суббореальной ЕТР до –6% (табл. 1).

Таблица 1. Изменение потоков явного и скрытого тепла (в %) между двумя периодами (1991–2020) и (1961–1990) гг. в летнее время.

Турбул. поток		Явное тепло	Скрытое тепло
Природная зона		SH	LH
ЕТР	субарктика	2	5
	бореальная	14	2
	суббореальная	17	–6
ЗС	субарктика	12	10
	бореальная	8	2
	суббореальная	7	0

Тренды турбулентного потока явного тепла тёплого периода за 1991–2020 гг. в субарктических и бореальных зонах статистически незначимы в пределах ± 0.04 МДж/м² за десятилетие, что составляет $\pm 1\%$ от среднего (рис. 5). Отрицательный тренд характерен для западной части субарктической и бореальной зон ЕТР и Западной Сибири. Напротив, в суббореальной зоне тренды значимо положительны, особенно в сухостепных и полупустынных ландшафтах ЕТР, со скоростью увеличения 0.2 МДж/м² за 10 лет (4–6%/10 лет). Тренды потоков скрытого тепла в большинстве случаев незначимы. Положительные тенденции отмечаются в бореальной и суббореальной зонах, где восходящие потоки увеличиваются со скоростью до 0.1 МДж/м² за 10 лет (около 3% от среднего). Значимые положительные тренды нисходящих потоков скрытого тепла наблюдаются в суббореальных ландшафтах востока ЕТР и запада ЗС (более 0.1 МДж/м²/10 лет, около 5% от среднего). В результате летних трендов потоков явного и скрытого тепла в 1991–2020 гг. положительный значимый тренд теплового баланса на основании отношения Боуэна ($Bo = SH / LH$) отмечался в суббореальной зоне (рис. 5).

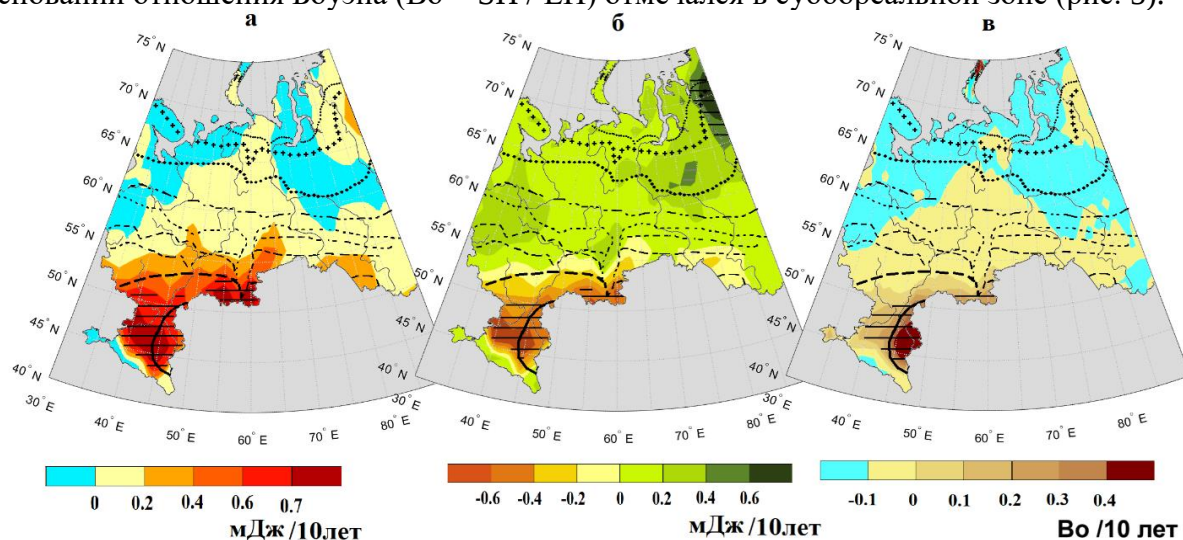


Рис. 5. Линейный тренд /10 лет за летний период 1991–2020 гг.: а) турбулентного потока явного тепла; б) турбулентного потока скрытого тепла; в) баланса теплообмена на основании отношения Боуэна. Значимые тренды показаны штриховкой (данные ERA5-Land).

Долгопериодная динамика аномалий баланса теплообмена в суббореальной зоне в июне и июле с середины XX века показывает, что на ЕТР до середины 1960-х годов преобладали положительные аномалии отношения Боуэна (усиление роли турбулентных потоков явного тепла). С середины 1960-х до начала 2000-х доминировали отрицательные аномалии (увеличение роли потоков скрытого тепла). С середины первого десятилетия XXI века вновь установился режим положительных аномалий. Этот сдвиг соответствует переходу от периода повышенного увлажнения к более аридным условиям (Золотокрылин и др., 2022). На юге Западной Сибири колебание баланса теплообмена выражено слабо, что говорит о некоторой стабильности теплообеспеченности в этой части суббореальной зоны (рис. 6).

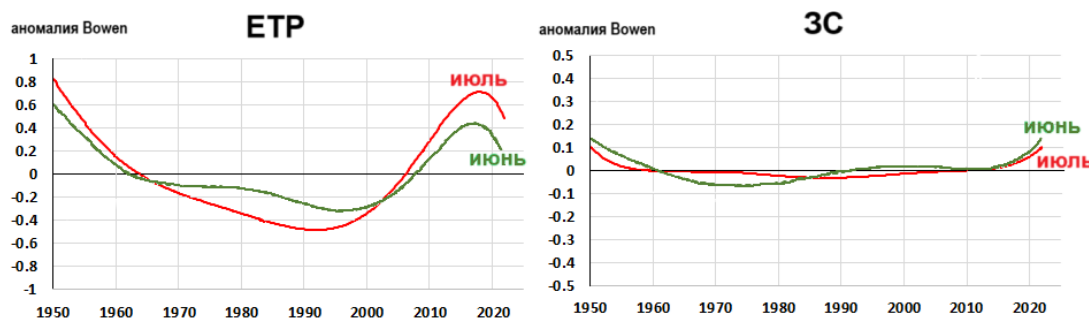


Рис. 6. Аномалии отношения Боуэна за период 1950–2022 гг., сглаженные полиномом 6-й степени относительно долговременной средней в июне и июле, южнее 50° с.ш. для ЕТР и Западной Сибири (данные ERA5-Land).

Анализ полей горизонтальных градиентов турбулентных потоков явного и скрытого тепла позволяет выделить две протяжённые зоны повышенной контрастности (рис. 7). Первая полоса максимальных градиентов охватывает среднюю тайгу и прилегающие части северной и южной тайги на ЕТР и в Западной Сибири. Её формирование связано с широтной зональностью и растительным покровом: на севере многолетняя мерзлота и разреженная растительность ограничивают потоки тепла; в средней тайге хвойные леса усиливают турбулентный обмен; в южной тайге преобладает высокая эвапотранспирация (Wild et al., 2013). Летом здесь повышена повторяемость циклонов из Атлантико-Европейского сектора (Бардин и др., 2015; Титкова и др., 2015). Взаимодействие «лес — климат» двустороннее: климат определяет состояние лесов, а леса через альбедо, влагоудержание и углеродный цикл влияют на региональный климат (Ольчев и др., 2017; 2025). Таким образом, среднетаёжные ландшафты выступают как региональная энергоактивная зона.

Вторая полоса повышенных градиентов турбулентных потоков явного тепла проходит в сухих степях ЕТР и степях Западной Сибири. Она связана с увеличением солнечной радиации, дефицитом почвенной влаги и сокращением летних осадков. Здесь максимальны градиенты температуры воздуха, осадков, вегетационного индекса, эвапотранспирации и влажности почвы (Титкова, Золотокрылин, 2020, 2022). Сухие степи влияют на климат через альбедо поверхности, радиационную температуру, фитомассу и пылевой аэрозоль (Золотокрылин, 2003; Горчаков, 2024). Следовательно, и в суббореальной зоне ЕТР и Западной Сибири выделяется региональная энергоактивная область. Диагностический признак обеих зон — повышенные горизонтальные градиенты турбулентных потоков явного и скрытого тепла (рис. 7 I).

В 1991–2020 гг. горизонтальная контрастность тепло-влагообмена возросла к северу от исходных максимумов (рис. 7 II). В субарктической зоне Западной Сибири наблюдается

рост турбулентных потоков скрытого тепла и мозаичное усиление потоков явного тепла на фоне летнего потепления ($+0.4\text{--}0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$). Значимый рост градиентов потоков тепло-влагообмена отмечен также в степной и лесостепной зонах ЕТР, где усиление температурных градиентов интенсифицирует турбулентный обмен, снижает влажность почвы и эвапотранспирацию, усугубляя иссушение (Титкова, Золотокрылин, 2022), особенно при увеличении числа летних блокирующих антициклонов на востоке ЕТР и западе Сибири (Бардин, 2021).

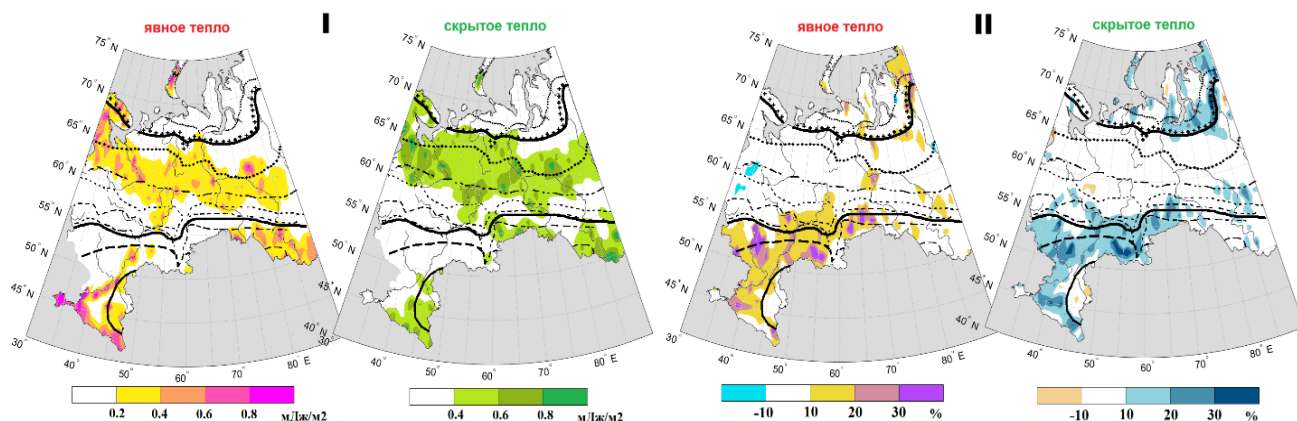


Рис. 7. Горизонтальные градиенты летних потоков явного и скрытого тепла на равнинах России за 1991–2020 гг. в расчёте на 1° широты/долготы: **(I)** среднее; **(II)** значимый тренд ($\%/10\text{ лет}$) (данные ERA5-Land).

В итоге изменение турбулентного тепло-влагообмена тёплого периода в первой четверти XXI века проявилось статистически значимым усилением потоков явного тепла с максимумом до 17% в суббореальной зоне, значимым ростом потока скрытого тепла в субарктике и бореальной зоне до 10% и его тенденцией к снижению в суббореальной зоне до -6% . Бореальные леса и сухие степи выделяются как региональные зоны высокой пространственной контрастности тепло-влагообмена до 1 МДж на 1° широты и долготы.

В результате было описано изменение пространственно-временной структуры турбулентного тепло-влагообмена тёплого периода в субарктической, бореальной и суббореальной зонах России в первой четверти XXI века, характеризующее отклик на современные климатические изменения. Были выделены региональные энергоактивные природные зоны, являющиеся ключевыми регионами воздействия климатических изменений на продуктивность экосистем.

В главе 5 оценены связи положения Арктического (АФ) и Полярного фронтов (ПФ), интенсивности фронтальных процессов, колебания общей циркуляции атмосферы на основе ведущих циркуляционных механизмов с климатической изменчивостью, включая тепло-влагообмен в природных зонах равнин России.

На основе анализа повторяемости центров циклонов (ЦЦ), градиента модуля адвекции тепла (АТ1000) и градиентов приземной температуры воздуха (Тв) были выделены две ветви Арктического фронта (Титкова и др., 2015). Главная ветвь проходит от побережья Скандинавии через Обскую губу на север Западной Сибири, разделяя арктические и субарктические воздушные массы в зоне тундр. Вторичная ветвь формируется летом над сушей и характеризуется максимумами повторяемости центров циклонов и повышенными градиентами температуры воздуха, локализуется на ЕТР в зоне южнотаёжных лесов, ближе к Уралу в зоне среднетаёжных лесов, а в Западной Сибири в

области среднетаёжных лесов (рис. 8 I). Сравнение периодов 1951–1980 гг. и 1981–2012 гг. не выявило значимых пространственных сдвигов Арктического фронта, но даже небольшие смещения климатологических фронтов на суше могут существенно влиять на термический режим, увлажнённость и продуктивность растительности. Вместе с тем интенсивность фронтальных процессов растёт. Так, среднее число центров циклонов в июле увеличилось между обозначенными периодами с 1.8 до 1.9 в полосе 70–87.5° с.ш. и с 4.8 до 5 в секторе 60–70° с.ш. Максимальные градиенты температуры на АТ1000 гПа возросли с 3.5 до 4.0 °C/мес., а адвекция тепла — с 5.0 до 5.5 °C/мес. На главной ветви Арктического фронта наблюдаются максимумы градиентов осадков и приземной температуры воздуха (рис. 9 I). На ЕТР в зоне влияния вторичной ветви Арктического фронта средние градиенты осадков выросли на 10 мм/10 лет, тогда как в Западной Сибири подобных изменений не зафиксировано. Таким образом, летом выделяются две ветви АФ. На фоне современного потепления их положение остаётся квазистационарным с увеличением интенсивности фронтальных процессов.

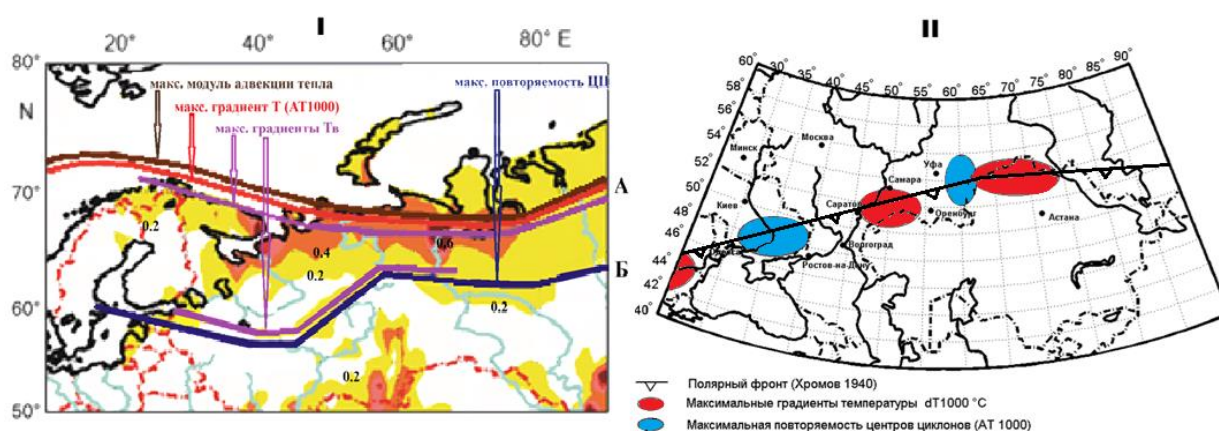


Рис. 8. (I) Положение Арктического Фронта, лето, 1981–2012 гг.: главная (А), вторичная ветвь (Б) и поле градиентов приземной температуры (цвет) с генерализованными линиями: максимальной повторяемости центров циклонов на Н1000 гПа, максимальных горизонтальных градиентов температуры воздуха на АТ1000 гПа, максимальных значений среднесезонного модуля адвекции тепла на Н1000; **(II)** схема положения Полярного фронта в летний период по максимальным градиентам температуры воздуха и максимальной повторяемости центров циклонов (данные UEA CRU).

Летний Полярный фронт над равнинами России располагается в зонах смешанных и широколиственных лесов, а также лесостепи. Он обеспечивает достаточное увлажнение для поддержания высокой продуктивности экосистем (рис. 8 II). По градиентам температуры воздуха на АТ1000 гПа его зона проходит на ЕТР в районе 42–45° с.ш. на западе и 50–53° с.ш. на востоке, а в Западной Сибири — между 53–55° с.ш. (переход от лесостепи к степи). Максимумы повторяемости центров циклонов наблюдаются на ЕТР в полосе 42–45° с.ш., а в ЗС — между 52–56° с.ш., то есть примерно на 1° южнее полосы наибольших контрастов температуры воздуха. Климатические изменения среднего положения Полярного фронта в период 1991–2010 гг. относительно 1948–1960 гг. на ЕТР проявляются в смещении к северу максимума градиента температуры воздуха и повторяемости центров циклонов примерно на 2° широты относительно 1948–1960 гг. В Западной Сибири

временных сдвигов среднего положения градиентов температуры не выявлено, но наблюдается смещение к югу частоты повторяемости центров циклонов на 2° широты (рис. 9 II). Согласно модельным расчётам, к середине XXI века положение летнего Полярного фронта над ЕТР и Западной Сибирью существенно не изменится, поскольку прогнозируемые изменения градиентов приземной Тв ожидаются незначительными (Черенкова, Школьник, 2011). Следовательно, барическая и фронтологическая структура региона, несмотря на ожидаемое повышение температуры воздуха, останется относительно стабильной.

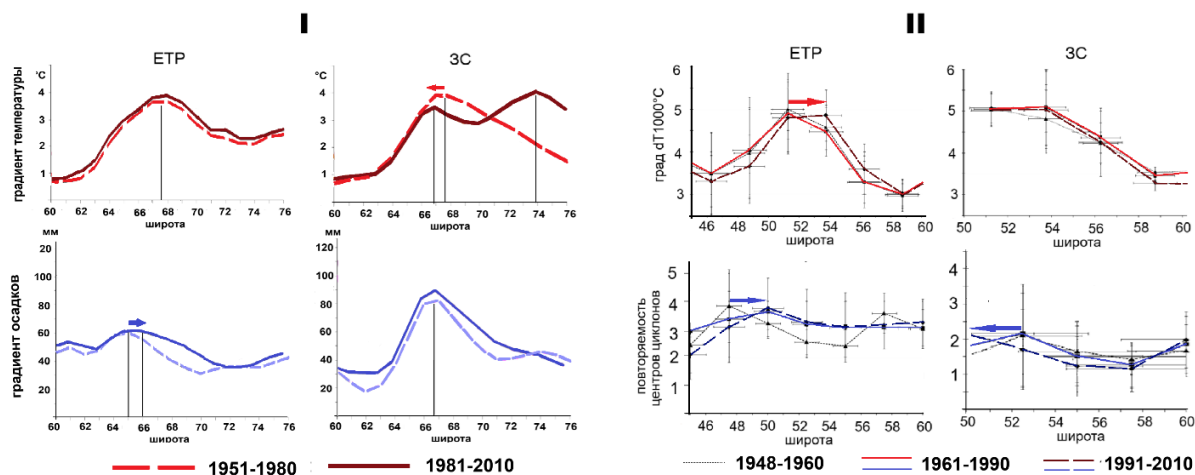


Рис. 9. Широтное изменение градиентов температуры и осадков, июль: **(I)** на Арктическом Фронте; **(II)** на Полярном Фронте (данные UEA CRU).

Анализ степени влияния колебания ведущих механизмов общей атмосферной циркуляции (ОЦА) Атлантико-Европейского и Северо-Тихоокеанского секторов, температуры поверхности океана (ТПО) в северной части Атлантики, а также температуры воздуха (Тв) на летние вертикальные потоки тепла и влаги в природных зонах проведён на основе регрессионного и корреляционного методов. Вклад ОЦА, ТПО и Тв в изменчивость турбулентных потоков явного тепла SH, скрытого тепла LH и дивергенции влаги (DM) может варьироваться от 40% до 90% в зависимости от природной зоны (табл. 2). Динамика температуры воздуха оказывает наиболее сильное воздействие на турбулентные потоки явного и скрытого тепла (β -коэффициенты значительно превышают 1). Влияние ОЦА на тепло-влагообмен в большей степени определяется динамикой арктической осцилляции (АО), скандинавской моды (SCAND) и колебанием «Восточная Атлантика — Западная Россия» (EAWR) и проявляется в природных зонах в разной степени. Для остальных рассмотренных циркуляционных мод — NAO (Северо-Атлантическое колебание), PNA (Тихоокеанско-Североамериканское колебание) — β -коэффициенты < 1 , что указывает на их слабое влияние на изменение тепло-влагообмена в рассматриваемом регионе.

Механизмы влияния ведущих циркуляционных мод на тепло-влагообмен по природным зонам следующие. В субарктической зоне в положительную фазу АО циклоны смещаются в высокие широты, увеличивая осадки и приток влажного воздуха. В отрицательную фазу волны холода снижают потоки явного тепла. Положительная фаза SCAND ослабляет зональный перенос, усиливая вторжение арктического воздуха на ЕТР и в ЗС, что снижает потоки тепла и влаги. Отрицательная фаза SCAND увеличивает потоки явного тепла и дивергенцию влаги на ЕТР, а в Западной Сибири — все потоки. Положительная фаза EAWR даёт отрицательные аномалии температуры и рост осадков в субарктической части ЕТР, увеличивая дивергенцию влаги. Отрицательная фаза EAWR

вызывает блокирующие антициклоны на севере ЕТР и в Западной Сибири, приводя к положительным температурным аномалиям и росту потоков тепла в Западной Сибири при избыточном увлажнении.

В *бореальной зоне* вклад циркуляции в изменение тепло-влагообмена ниже ($R^2 = 0.36–0.56$) из-за буферного эффекта лесного полога (реакции потоков ослаблены и запаздывают). АО влияет на явное тепло на ЕТР и в ЗС, а также на скрытое тепло в ЗС ($\beta > 1$). Положительная фаза АО увеличивает потоки явного тепла, в ЗС также и скрытого, а отрицательная снижает явное тепло из-за притока холодных воздушных масс. Положительная фаза SCAND усиливает блокирующие антициклоны и вторжения арктического воздуха, снижая явное тепло и дивергенцию влаги. Отрицательная фаза (западный перенос) увеличивает эти потоки. EAWR влияет на скрытое тепло и дивергенцию влаги преимущественно на ЕТР. Положительная фаза (циклоническая циркуляция) снижает явное тепло и увеличивает дивергенцию влаги; отрицательная (повышенное давление) — увеличивает температуру и явное тепло, но уменьшает дивергенцию влаги.

В *суббореальной зоне* вклад циркуляции снова высок ($R^2 > 0.6$; корреляция 0.6–0.7) из-за меньшей теплоёмкости поверхности. Для АО, SCAND и EAWR β -коэффициенты больше 1. Положительная фаза АО формирует область повышенного давления с сухой и тёплой погодой (растёт явное тепло, падают потоки влаги). Положительная фаза SCAND усиливает вынос арктического воздуха на юг, снижая потоки тепла и влаги на ЕТР и в ЗС. Отрицательная фаза SCAND (западный перенос) вызывает положительные аномалии температуры на юге ЕТР и ЗС, увеличивая оба турбулентных потока. Положительная фаза EAWR способствует выносу холодного воздуха, ослабляя потоки на ЕТР. Отрицательная фаза EAWR ведёт к росту явного тепла и падению скрытого из-за дефицита влаги. В ЗС влияние EAWR на тепловые потоки слабее. Существенен вклад ТПО ($\beta > 1$). Потепление вод Северной Атлантики повышает частоту засух, что увеличивает явное тепло и уменьшает потоки влаги.

Таблица 2. Результаты регрессионного анализа влияния ведущих циркуляционных мод (NAO, АО, PNA, SCAND, EAWR), ТПО, температуры воздуха T_v на турбулентные потоки явного (SH), скрытого тепла (LH), дивергенции влаги (MD) по природным зонам ЕТР и ЗС в летний период. Выделены параметры с $\beta > 1$.

район	зона	поток	β -коэффициенты							Корреляция	Коэфф. детерминации
			NAO	АО	PNA	SCAND	EAWR	ТПО	T_v		
ЕТР	Субарктика	SH	0.1	1.5	0.5	1.1	0.8	0.7	0.9	0.6	0.7
		LH	0.7	1.1	0.4	0.4	0.3	0.6	2.7	0.9	0.8
		DM	0.9	0.5	0.3	1.1	1.3	0.2	0.6	0.7	0.7
	Бореальная	SH	0.7	1.3	0.9	1.8	0.5	0.4	1.8	0.7	0.5
		LH	0.04	0.4	0.1	0.8	1.1	0.4	1.6	0.8	0.6
		DM	0.7	0	0.9	2.7	1.4	0.5	2.6	0.8	0.6
	Суббореальная	SH	1.4	3.7	0.9	1.8	2.6	0.6	5	0.8	0.6
		LH	2.4	4.8	1.1	1.2	2.9	1.1	3.6	0.6	0.6
		DM	0.2	1.1	0.2	0.9	0.2	1	1.3	0.7	0.5
ЗС	Субарктика	SH	0.1	1.4	0.2	1.9	0.9	1	1.4	0.7	0.5
		LH	0.6	0.2	0.8	1.2	1.1	0.2	3.2	0.9	0.9
		DM	0.7	3.1	0.6	1.6	0.2	0.6	1.4	0.5	0.5
	Бореальная	SH	0.8	1.3	0.8	1.9	0.7	0.4	1.8	0.7	0.4
		LH	0.1	1.1	0.3	0.1	0.2	0.1	1.9	0.7	0.6
		DM	0.2	0.2	0.9	1.7	0.5	0.2	2.4	0.6	0.4
	Суббореальная	SH	0.2	2.4	1.1	2.8	0.5	1.1	6.1	0.8	0.6
		LH	0.1	1.4	0.2	2.6	0.3	1.8	4.6	0.7	0.5
		DM	0.8	2	0.6	0.5	0.3	0.3	2.6	0.6	0.4

Смена преобладающих фаз ведущих циркуляционных мод АО (с отрицательной на положительную), SCAND и EAWR (с положительной на отрицательную) в конце XX века привела к значительной пространственной перестройке их влияния на тепло-влагообмен (рис. 10). Наиболее ярко эти изменения проявились в субарктической зоне ЕТР и Западной Сибири, где многократно возросла площадь и сила воздействия этих циркуляционных механизмов на турбулентные потоки тепла на 30–85%. В бореальной зоне изменения носят более избирательный характер. Смена преобладающей фазы SCAND в начале XXI века с положительной на отрицательную вызвала рост площади её влияния на потоки скрытого тепла на 37%. В *суббореальной зоне* последствия изменения фаз SCAND и EAWR оказались менее выраженными. Наблюдается некоторое сокращение области влияния этих мод на потоки скрытого тепла (до –12%). Это свидетельствует о том, что современный климатический режим (1991–2020 гг.) характеризуется усилением роли меридиональных процессов и блокирований, задаваемых модами SCAND и EAWR, что в наибольшей степени трансформирует тепло-влагообмен в высокоширотных регионах.

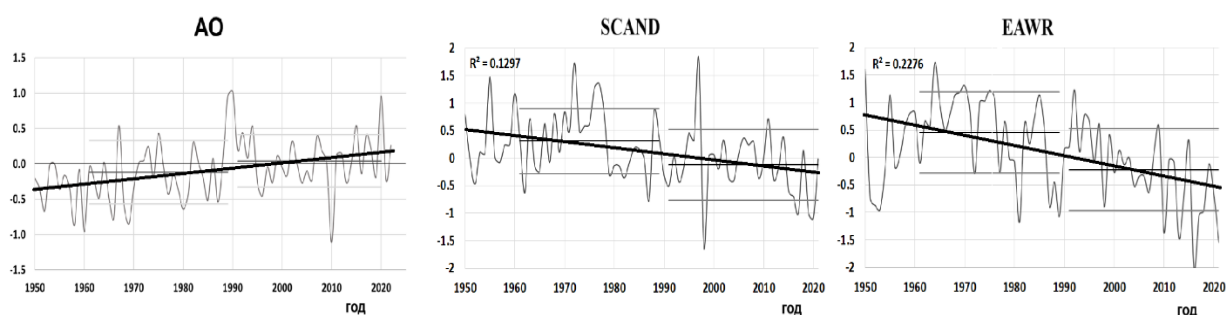


Рис. 10. Временные ряды циркуляционных индексов АО, SCAND, EAWR со средним и стандартным отклонением за периоды 1961–1991 гг. и 1991–2020 гг. и тренд за 1950–2022 гг.

Таким образом, общий вклад колебаний приповерхностной температуры воздуха, температуры поверхности океана, общей циркуляции атмосферы в изменчивость тепло-влагообмена достигает в субарктике 90%, в бореальной зоне 40% и в суббореальной 60%. Температура выступает наиболее информативным предиктором этой изменчивости во всех зонах. В результате впервые оценён вклад роста приповерхностной температуры воздуха и температуры поверхности океана, циркуляции атмосферы, интенсивности пространственных характеристик Арктического и Полярного фронтов на региональные процессы тепло-влагообмена на равнинах России.

В главе 6 представлены диапазоны альбедо поверхности (Al), радиационной температуры (Ts) и вегетационного индекса (NDVI) основных ландшафтов равнин ЕТР и Западной Сибири, рассчитанные на основе спутникового мониторинга. Дана количественная оценка изменений этих параметров в летние месяцы первой четверти XXI века. Выявлены и проанализированы взаимосвязи между климатическими параметрами, турбулентным тепло-влагообменом и характеристиками поверхности, а также показана их пространственно-временная динамика.

Совокупность отражательных и поглощательных свойств поверхности формирует уникальный спектральный портрет подстилающей поверхности. Оценка широтной динамики параметров показала, что Al изменяется с широтой по кривой, близкой к

неправильной параболы (рис. 11). Наибольшая вариабельность Al наблюдается в подтаёжных ландшафтах (0.14–0.17). Изменение Ts с широтой близко к линейности. Изменение $NDVI$ аппроксимируется параболой, с изменчивостью в пределах природной зоны не более 0.1.

Динамика абсолютных значений и статистических связей между ключевыми отражательными и поглощательными свойствами ландшафта представляет собой информативный индикатор изменений в структуре и функционировании экосистем и отражает устойчивость ландшафта к климатическим колебаниям и антропогенным воздействиям. Например, корреляция Al и Ts может быть как положительной (ландшафты с развитым растительным покровом), так и отрицательной (деградированные ареалы с отсутствующим или скудным растительным покровом), что указывает на механизм терморегуляции поверхности. В широколиственных лесах, где Al стабильно, а Ts растёт, связь близка к нулю, что свидетельствует об её неустойчивости.

Связь Ts и $NDVI$ также варьируется. Положительная значимая корреляция, при которой оба параметра Ts и $NDVI$ растут или снижаются синхронно, типична для тундры. В лесотундре из-за мозаичности растительного покрова связи могут быть как положительными, так и отрицательными. В таёжной зоне, где $NDVI$ максимален при стабильной Ts , связь слабо отрицательная. В степях и полупустынях $NDVI$ линейно снижается при росте Ts .

Если рассматривать зависимости Al и $NDVI$, то можно отметить, что в тундре и лесных зонах связь в целом отрицательна, в лесостепи и степи неустойчива, а в полупустыне становится устойчиво отрицательной.

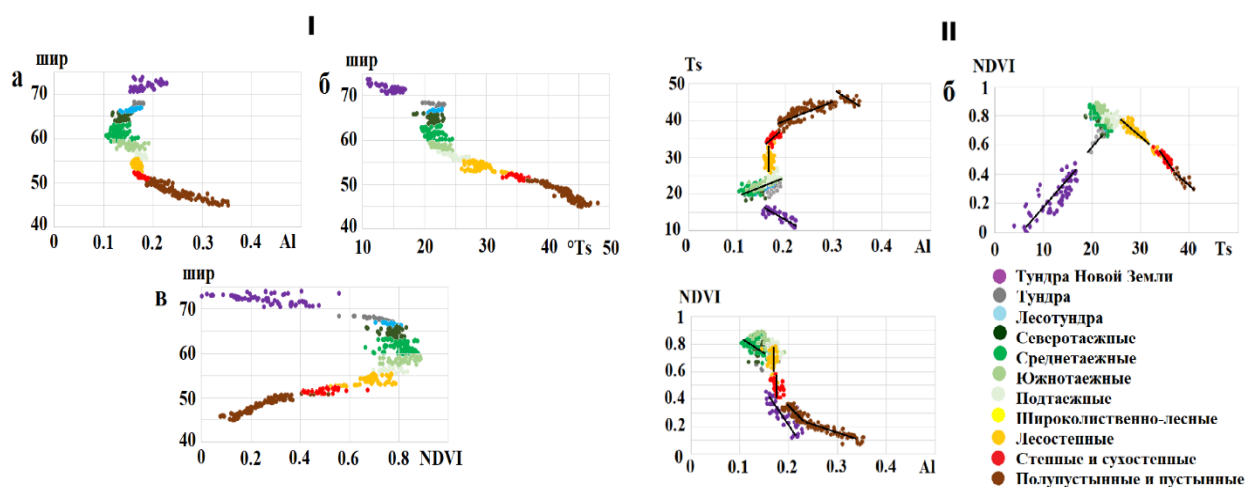


Рис. 11. Характеристики ландшафтов на широтном профиле 55° в.д., июль, 2000–2020 гг., (I) среднее: а) альbedo Al ; б) температура поверхности Ts ; в) вегетационный индекс $NDVI$; (II) связи характеристик: а) Al — Ts ; б) Ts — $NDVI$; в) Al — $NDVI$ (данные MODIS).

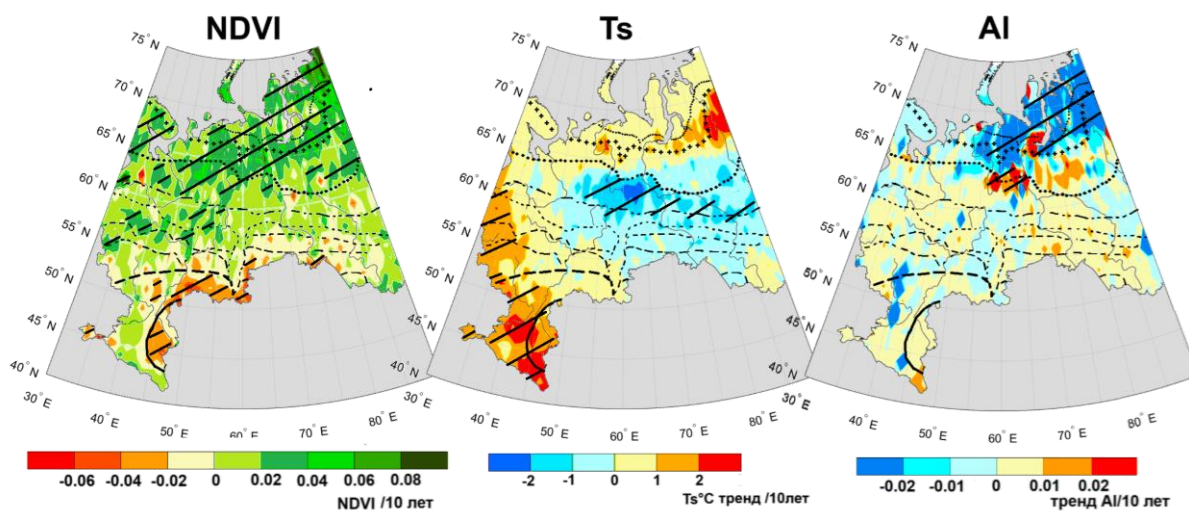


Рис. 12 Тренды характеристик поверхности, июнь, 2000–2024 гг.: вегетационный индекс NDVI/10 лет; радиационная температура поверхности Ts/10 лет; альbedo поверхности AI/10 лет. Значимые тренды показаны штриховкой.

Оценка динамики свойств поверхности в XXI веке показана на примере июня, для которого характерны максимальные изменения (рис. 12). В субарктике положительный тренд T_v в летние месяцы привёл к положительному тренду NDVI, который сопровождался ростом Ts и отрицательным трендом AI, что говорит об увеличении биомассы. В бореальной зоне наблюдается рост NDVI, что сопровождается уменьшением Ts и незначимым изменением AI. В суббореальной зоне рост T_v , уменьшение годовых осадков привели к падению NDVI. Изменение AI мозаично и незначимо, что связано с большой антропогенной дифференциацией поверхности.

Связь температуры и осадков с характеристиками поверхности (NDVI, AI, Ts) позволяет оценить, как изменение климата влияет на растительный покров, а через него на AI и Ts, замыкая обратные связи (рис. 13 I). В субарктике максимальная положительная корреляция T_v — NDVI достигает +0.8 в июне, когда тепло начинает работать как лимитирующий фактор, и сохраняется до +0.6 в конце лета. В южно-таёжных и подтаёжных ландшафтах знак корреляции меняется. В суббореальной зоне (степи, лесостепи) корреляция становится устойчиво отрицательной (до -0.8). Здесь рост температуры воздуха, особенно во второй половине вегетационного сезона, подавляет вегетацию, ускоряя фенологию, вызывая тепловой стресс и усиливая засуху. Влияние осадков на NDVI также зонально (рис. 13 I). В субарктике и бореальной зоне связь минимальна в июне, чему способствует накопленная влага после снеготаяния, и умеренно растёт к июлю — августу. В суббореальных ландшафтах осадки являются критическим ресурсом. Количество и режим осадков положительно связаны с NDVI весь тёплый сезон, определяя продуктивность ландшафтов и устойчивость к засухам.

Динамика взаимосвязи между турбулентными потоками явного тепла и вегетационным индексом демонстрирует чёткую сезонную и зональную специфику (рис. 13 II). Сопряжённость фитомассы и потока явного тепла в течение летнего периода в субарктической и бореальной зонах максимально положительна в июне и затем ослабевает, а в суббореальной зоне отрицательна и усиливается от июня к июлю. Анализ взаимосвязи между турбулентными потоками скрытого тепла и фитомассой демонстрирует устойчивую положительную корреляцию на протяжении большей части летнего сезона, что подтверждает ключевую роль растительного покрова в процессе эвапотранспирации. Однако сила этой связи имеет выраженную пространственно-временную динамику с

региональными особенностями (рис. 13 II). В результате связь турбулентного тепло-влагообмена с NDVI наиболее отчётливо проявляется в условиях дефицита фитомассы в разреженных ландшафтах *субарктики* и *суббореальной зоны*, где растительность выступает ключевым регулятором эвапотранспирации.

Принципиальное различие между ЕТР и ЗС наиболее ярко выражено для потоков явного тепла, что является следствием контрастов в режиме увлажнения почв. В целом взаимосвязь NDVI с потоками скрытого тепла оказывается систематически сильнее, чем с потоками явного тепла, что подчёркивает доминирующую роль процессов испарения и транспирации в формировании энергетического баланса подстилающей поверхности.

Выявленные тренды тепло-влагообмена и NDVI в первой четверти XXI века показали сезонную и зональную специфику для равнин ЕТР и ЗС. Чувствительность растительности к росту теплообеспеченности максимальна в первой половине лета. В *субарктике* даже небольшой рост потоков явного тепла стимулируют вегетацию, тогда как в *суббореальной зоне* рост явного тепла и падение скрытого угнетают фитомассу. На фоне выявленных трендов происходит эволюция статистических взаимосвязей между параметрами тепло-влагообмена и NDVI. С начала XXI века изменение взаимосвязей между тепло-влагообменом и NDVI отчётливее проявляется на ЕТР, чем в ЗС. Связь потоков явного тепла с NDVI усиливается в июне и августе и слабеет в середине лета. Связь потоков скрытого тепла с фитомассой растёт в июне и августе в субарктике и бореальной зоне ЕТР, но ослабевает в южных регионах на всём протяжении лета. Полученные результаты подчёркивают, что реакция растительного покрова на современные климатические изменения носит нелинейный характер и критически зависит от фенологической фазы и ландшафтных условий.

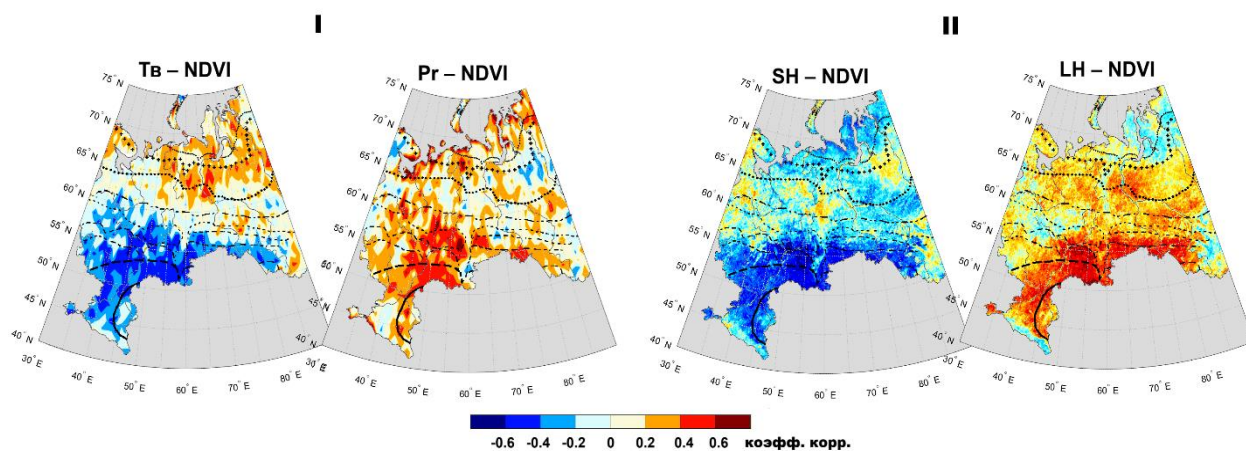


Рис. 13. Поля корреляции, июль, 2000–2024 гг.: (I) температуры воздуха Tв и осадков Pr с NDVI и (II) потока явного SH и скрытого тепла LH с NDVI.

Для систематизации летних связей между турбулентными потоками (явное и скрытое тепло, дивергенция влаги) и характеристиками поверхности (Ts, Ev, NDVI, влажность почвы Sw), а также их эволюции в XXI веке построена схема для ЕТР и ЗС с визуализацией значимых связей ($p < 0.05$) и трендов (рис. 14). Ключевая закономерность — резкое усиление взаимодействия атмосферы и поверхности от *субарктической* до *суббореальной зоны*. Наибольшая плотность связей прослеживается от подтаёжной зоны до полупустыни на ЕТР и до степей в Западной Сибири, где разреженная фитомасса обладает меньшей буферной ёмкостью. В тайге при сомкнутом растительном покрове тепло-влагообмен замыкается внутри растительности, ослабляя прямые связи.

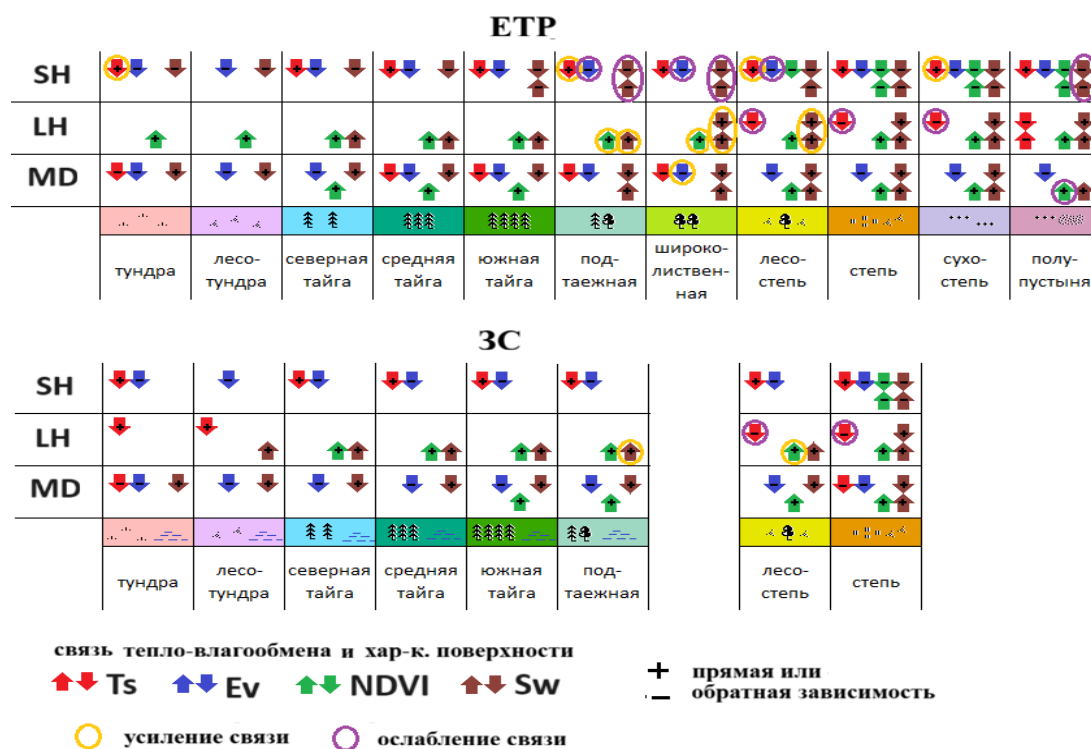


Рис. 14. Схема значимых связей ($p < 0.05$) явного тепла SH, скрытого тепла LH (данные ERA5-Land) и дивергенции влаги MD (данные ERA5) и характеристик поверхности: Ts, NDVI, Ev (данные MODIS), Sw в слое 0–28 см (данные ERA5-Land) по ландшафтам ЕТР и ЗС, лето 2000–2024 гг. Стрелка вниз — влияние потоков на характеристики поверхности, стрелка вверх — влияние характеристик поверхности на параметры турбулентного тепло-влажнообмена. Знак + или – указывает на прямую или обратную зависимость характеристик. 1 — усиление связи, 2 — ослабление связи.

Анализ характера связей между тепло-влажнообменом и характеристиками поверхности выявил систематические различия между ЕТР и Западной Сибирью, обусловленные региональными особенностями увлажнения. В Западной Сибири преобладает избыточное увлажнение и значительная заболоченность, тогда как на ЕТР более выражены дренаж и летний дефицит влаги. Эти различия определяют зональную специфику корреляционных связей между турбулентными потоками и параметрами поверхности. Так, на ЕТР значимые связи потоков явного тепла с температурой поверхности, испарением, вегетационным индексом и влажностью почвы прослеживаются преимущественно в зонах от лесостепи до полупустыни, тогда как в Западной Сибири аналогичные зависимости статистически значимы лишь в степной зоне. В субарктических и бореальных ландшафтах, напротив, вегетационный индекс слабо зависит от потоков явного тепла, что связано с избыточным увлажнением, ограничивающим прогревание поверхности.

Иная картина наблюдается для потоков скрытого тепла. Они выступают в качестве универсального ключевого фактора, в значительной степени определяемого состоянием самой поверхности. Связи скрытого тепла с вегетационным индексом и влажностью почвы положительны во всех природных зонах за исключением тундры Западной Сибири, где специфические почвенно-гидрологические условия ослабляют эту зависимость.

Наиболее значимые трансформации указанных связей в XXI веке происходят в переходной полосе от подтаёжной зоны до степей. Здесь рост потоков явного тепла усилил их корреляцию с температурой поверхности, а также отрицательные обратные связи с

испарением и влажностью почвы. Это формирует положительную обратную связь, способствующую усилению аридизации: рост температуры вызывает иссушение почвы, что, в свою очередь, приводит к перераспределению энергии в пользу нагрева поверхности в ущерб испарению. В то же время отрицательный тренд скрытого тепла в суббореальной зоне усилил его корреляцию с вегетационным индексом и влажностью почвы, что свидетельствует о более экономном расходовании оставшейся влаги в условиях её дефицита.

Таким образом, природные зоны различаются характером статистических связей между альбедо поверхности, радиационной температурой, вегетационным индексом, которые в свою очередь значимо взаимосвязаны турбулентным тепло-влагообменом от подтаёжной зоны до полупустыни. Впервые по данным дистанционного зондирования определены диапазоны характеристик поверхности как индикаторов климатически обусловленной динамики ландшафтов, что расширяет теоретическую базу ландшафтной климатологии и дистанционного зондирования.

В главе 7 представлен подход объективного дешифрирования оголённых и деградированных ареалов земной поверхности на основании анализа формулы для температуры поверхности из уравнения теплового баланса деятельного слоя. Он основан на выявлении радиационного механизма терморегуляции поверхности (отрицательная корреляция между Al и T_s) на фоне эвапотранспирационного механизма, доминирующего в различных природных зонах с развитым растительным покровом. Изменение терморегуляции поверхности в значительной степени связано с рельефом и локальными природными условиями. Выявленные процессы служат дополнительным индикатором эволюции ландшафтов в условиях изменения климата.

Анализ связи Al — T_s свидетельствует о конкуренции двух основных механизмов терморегуляции поверхности: радиационного и эвапотранспирационного (Becker et al., 1988). Каждый механизм соответствует определённому знаку корреляции между Al и T_s . Интенсивность деградации при этом количественно определяется величиной отрицательного коэффициента корреляции (r): $r \leq -0.2$ — слабая, $r \leq -0.4$ — средняя, $r \leq -0.6$ — сильная деградация.

Эвапотранспирационный механизм становится преобладающим в ландшафтах со сформированным растительным покровом, где он выступает ключевым фактором терморегуляции (рис. 15). В этом случае значительная доля поглощённой радиации расходуется на транспирацию и испарение. Растительность в процессе развития снижает альбедо поверхности. Основная доля поглощённой солнечной радиации преобразуется в потоки скрытого тепла за счёт увеличения испарения и транспирации, в результате снижается T_s . Формируется положительная связь Al — T_s . Развитие растительности также влияет на температуру, поглощая солнечную радиацию для фотосинтеза и повышая T_v , однако эта связь является косвенной и зависит от таких факторов, как вид растительности, влажность почвы, рельеф и другие.

При преобладании радиационного механизма наблюдается отрицательная корреляция Al — T_s (рис. 15). В этом режиме основная доля поглощённой солнечной радиации преобразуется в явное тепло. Бóльшая часть радиационного баланса расходуется на нагрев приземного воздуха за счёт усиленного уходящего длинноволнового излучения и турбулентного теплообмена (потока явного тепла). Увеличение Al уменьшает поглощение солнечной радиации почвой и, следовательно, её прогрев. Данный механизм характерен для ландшафтов с разреженным или отсутствующим растительным покровом (Титкова, Золотокрылин, 2025).

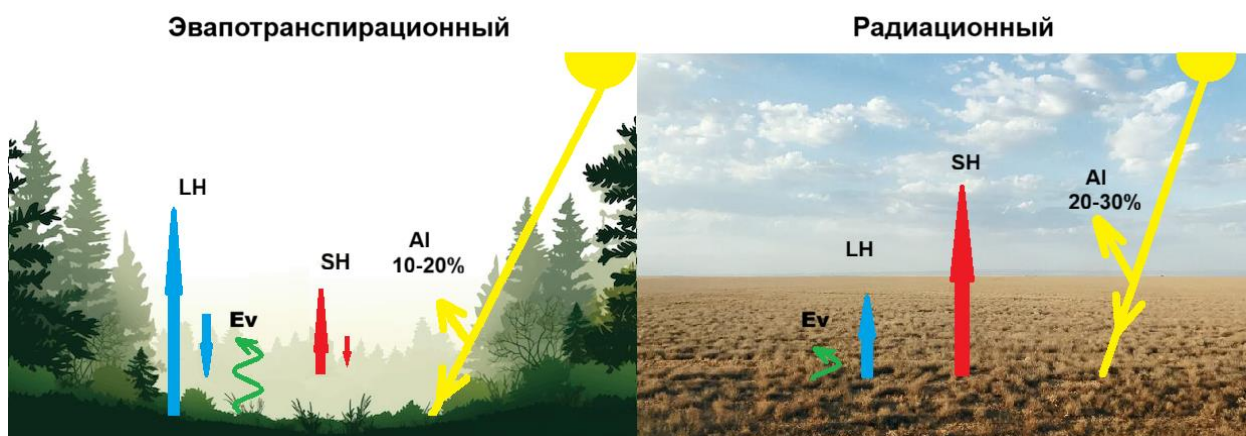


Рис. 15. Турбулентный тепло-влагообмен и альбедо поверхности при эвапотранспирационном и радиационном механизме регулирования температуры подстилающей поверхности.

Анализ связи $AI - Ts$ выявляет доминирующий механизм терморегуляции, что важно для оценки уязвимости ландшафтов к климатическим и антропогенным изменениям (рис. 16). В *суббореальной зоне* диагностика деградированной растительности основана на модели климатического опустынивания с положительной обратной связью, где рост альбедо поверхности приводит к снижению поглощённой радиации и температуры поверхности, что ослабляет конвекцию и приводит к локальному сокращению осадков. Всё это приводит к дальнейшей деградации растительности. Корреляционный анализ между AI и Ts служит эффективным инструментом картирования очагов опустынивания. В засушливых регионах устойчиво доминирует радиационный механизм регулирования температуры поверхности. Например, в центральной Калмыкии коэффициент корреляции $AI - Ts$ варьирует от -0.2 до -0.4 , а в сухие годы до -0.6 . Здесь разреженный растительный покров теряет способность к транспирации, и основная часть поглощённой радиации расходуется на явное тепло.

В *бореальной зоне* под сомкнутой растительностью доминирует эвапотранспирационный механизм терморегуляции (положительная связь $AI - Ts$). Рост температуры стимулирует транспирацию, преобразуя энергию в скрытое тепло, что нагревает и увлажняет приземный воздух. Возникает положительная обратная связь, поддерживающая Ts . Этот режим характерен для тайги и болот, где эвапотранспирация стабилизирует термический режим. На участках с угнетённым лесным покровом (пожары, засухи, антропогенное воздействие) эвапотранспирация ослабевает, энергия перераспределяется в пользу явного тепла — происходит переход к радиационному типу терморегуляции, что указывает на глубокую экологическую дисфункцию и затрудняет восстановление растительности.

В *субарктике* при общем избытке влаги и контрастных типах растительности (от оголённых участков до сплошных мхов) локальные поверхности без растительного покрова демонстрируют радиационный тип регулирования температуры поверхности. Он характеризуется преобладанием явного тепла над испарением. Это подтверждено полевыми данными, где измеренное отношение Боуэна составило около 3.5 в окрестностях Тикси в полуденные часы (Тепловодообмен..., 2007). Также в июле наблюдается отрицательная корреляция $AI - Ts$ на каменистых участках равнинных и горных тундр Новой Земли. Радиационный механизм терморегуляции поверхности в тундре структурно сходен с очагами опустынивания суббореальной зоны, где отсутствие или деградация

растительности усиливают нагрев приземного воздуха за счёт явного тепла, формируя устойчивые термические аномалии.

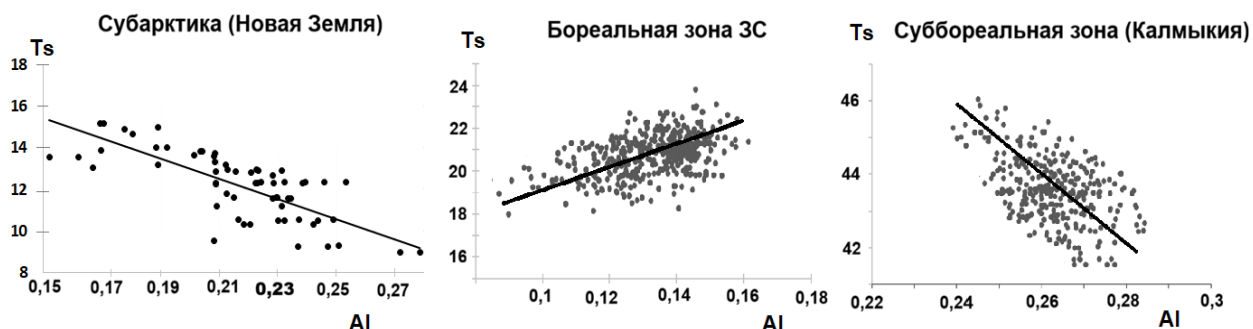


Рис. 16. Примеры типов терморегуляции поверхности по устойчивой связи $AI — Ts$ в природных зонах: радиационного типа в субарктике Новой Земли (июль 2019), эвапотранспирационного типа в бореальной зоне Западной Сибири (август 2020, 63–64° с.ш., 71–72° в.д.), радиационного типа в суббореальной зоне Калмыкии (август 2020, 46.5–47° с.ш., 44–45.5° в.д.).

Внутри одной зоны могут сосуществовать оба механизма терморегуляции поверхности, а отрицательная связь $AI — Ts$ служит универсальным спутниковым индикатором уязвимых, деградирующих территорий или потенциальных очагов опустынивания. Пространственная картина распределения механизмов терморегуляции также имеет сезонную специфику.

Например, в июне в *субарктической* зоне Средней Сибири при недостаточно развитом растительном покрове тундр и северной тайги радиационный механизм доминирует на каменистых и горных поверхностях, занимая около 39% территории. С 2000 по 2024 гг. его площадь сокращается (2.5% за десятилетие, табл. 3), что указывает на «озеленение» в начале лета. В июле — августе ареал радиационного регулирования резко сужается до горных районов тайги и лесотундры, где стабильно занимает 20–25% площади, практически не меняясь с начала века, что свидетельствует об устойчивости экосистемы во второй половине лета.

В *бореальной* зоне преобладает эвапотранспирационный тип регулирования Ts . Повышение $Tв$ усиливает этот механизм: снижение AI на фоне роста $NDVI$ ведёт к увеличению эвапотранспирации и понижению радиационной температуры поверхности. На юге Средней Сибири (южная и горная тайга) в июне корреляция $AI — Ts$ достигает 0.55, к концу лета снижаясь до 0.33, тогда как изменения фитомассы статистически незначимы. Летом здесь наблюдаются мозаичные участки деградации растительности, частично связанные с потеплением и лесными пожарами. На открытых участках горной тайги радиационный тип занимает чуть более 20% площади (табл. 3). В июне на фоне потепления и пика вегетации зоны с радиационным механизмом терморегуляции поверхности незначительно сократились, однако в июле — августе дальнейший рост $Tв$ привёл к их мозаичному увеличению на 0.5–0.6% за десятилетие в обеих подзонах. Таким образом, потепление в бореальной зоне усиливает эвапотранспирацию, но учащение пожаров способствует мозаичному росту площади с радиационным типом регулирования Ts .

В *суббореальной* зоне в июне повышение $Tв$ стимулирует развитие растительности (особенно в степи), усиливая эвапотранспирационный тип регулирования Ts (корреляция $AI — Ts$ +0.27). Однако в июле — августе накопленный эффект высоких температур негативно влияет на вегетационный индекс, и корреляция становится отрицательной (–0.3).

Ландшафты с радиационным механизмом на юге ЕТР приурочены к полупустыням Прикаспия и деградированным землям сухостепной зоны, где радиационный баланс в основном расходуется на нагрев почвы и воздуха, формируя устойчивые очаги иссушения. Наиболее выраженный очаг опустынивания, активно развивающийся летом, возник в начале XXI века на границе Калмыкии и Астраханской области (полупустыни). Менее масштабные очаги отмечены в степной зоне Краснодарского и Ставропольского краёв. В среднем за лето такие земли занимают около 18% площади суббореальной зоны ЕТР. Хотя тренд увеличения очагов опустынивания за 2000–2024 гг. статистически незначим, это не исключает их резкого расширения в экстремально засушливые годы.

Таким образом, ареалы с радиационным типом терморегуляции выделяются по обратной связи между альбедо и радиационной температурой, служат индикаторами деградации поверхности вследствие климатических флуктуаций и антропогенной нагрузки. Предложенный и теоретически обоснованный метод выявления ареалов с деградированной растительностью природного и антропогенного происхождения по данным спутникового мониторинга создаёт объективный инструмент для выявления и оценки динамики очагов деградации поверхности.

Таблица 3. Площадь (%) с радиационным типом регулирования температуры поверхности (корреляция альбедо и радиационной температуры меньше -0.2) в природных зонах, летние месяцы 2000–2024 гг.

природная зона	район	среднее	стандартное отклонение	тренд/10 лет
июнь				
субарктическая	III Север Средней Сибири	39.1	4.6	–2.4
бореальная	II Юг Средней Сибири	23.6	1.5	–0.3
суббореальная	I Юг ЕТР	18.2	1.5	–0.1
июль				
субарктическая	III Север Средней Сибири	20.7	1.4	–0.2
бореальная	II Юг Средней Сибири	23.1	1.5	0.6
суббореальная	I Юг ЕТР	17.6	2.3	0.3
август				
субарктическая	III Север Средней Сибири	24.3	2.4	–0.3
бореальная	II Юг Средней Сибири	26	1.3	0.5
суббореальная	I Юг ЕТР	18	2.5	0.5

Значимые тренды: положительные — красным, отрицательные — зелёным. Тенденции: положительные — светло-коричневым, отрицательные — светло зелёным.

Глава 8 посвящена выделению и анализу пространственно-временной изменчивости переходных климатических зон (transitional climate zones, TCZ) на равнинах России, определяемых как зонально-климатические рубежи, на основе максимумов градиентов климатических параметров, тепло-влагообмена, отражательных и поглощательных свойств поверхности. Исследования показывают высокую чувствительность переходных зон к глобальным климатическим изменениям (Krajick, 2018). При этом граница, чётко выраженная по одному параметру на определённом масштабе, может становиться размытой при переходе к другому иерархическому уровню. Мониторинг этих зон выявил их сложную локальную структуру и динамику, а также позволил определить ключевые районы с наиболее контрастными показателями.

Ключевые участки переходной климатической зоны на севере России выделялись на основе выраженных и статистически значимых градиентов климатических параметров, характеристик тепло-влагообмена и спектральных свойств поверхности. Одним из таких участков является северо-восток ЕТР — Большеземельская тундра, охватывающая

тундровые, лесотундровые и северо-таёжные ландшафты. При однородном рельефе эта территория находится в зоне влияния главной ветви Арктического фронта, что обуславливает повышенные градиенты приземной температуры воздуха и максимумы среднесезонного модуля адвекции тепла.

Пространственное распределение параметров, характеризующих зонально-климатический рубеж, демонстрирует чёткую дифференциацию по типам градиентов. Максимальные градиенты температуры воздуха (более $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 0.5° широты) приурочены к лесотундре, тогда как градиенты осадков оказываются размытыми и проявляются лишь южнее оси главной ветви Арктического фронта. Градиенты вегетационного индекса, превышающие 0.05 на 0.5° широты (что составляет 10–15% от фоновых значений), локализируются фрагментарно на границе тундры и лесотундры. Наиболее выраженные градиенты эвапотранспирации (свыше 0.25 л/м^2 в сутки на 0.5° широты) приурочены к рубежу между северной тайгой и лесотундрой в зоне резкой смены биопродуктивности. Градиенты явного тепла формируют две обособленные области, тяготеющие к северной лесотундре и северной тайге, тогда как градиенты скрытого тепла значительно возрастают в северной части северо-таёжной зоны.

На основе совокупности линий максимальных градиентов построена комплексная схема (рис. 17), интегрирующая климатические показатели, тепло-влажнообеспеченность и спектральные характеристики подстилающей поверхности. Схема подтверждает существование природно-зонального рубежа в пределах южной тундры, лесотундры и северной границы тайги, совпадая с районом влияния главной ветви Арктического фронта.

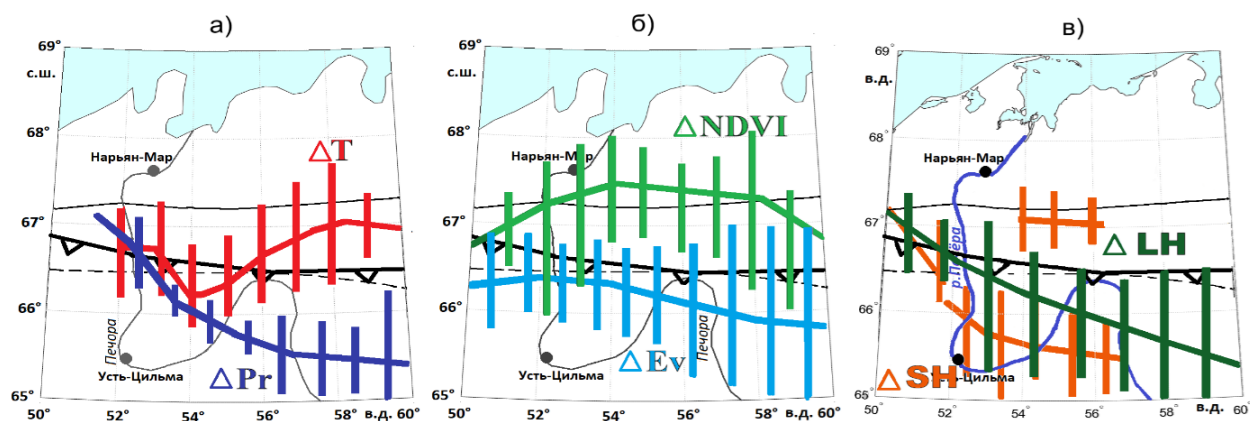


Рис. 17. Зонально-климатический рубеж на северо-востоке ЕТР (Большеземельская тундра). Максимальные градиенты с их доверительными интервалами, июль, 2000–2020 гг.: а) климатических параметров (красный — температура, темно-синий — осадки); б) спектральных параметров (зелёный — NDVI, голубой — эвапотранспирация); в) теплообмена (оранжевый — поток явного тепла, темно-зелёный — скрытого тепла).

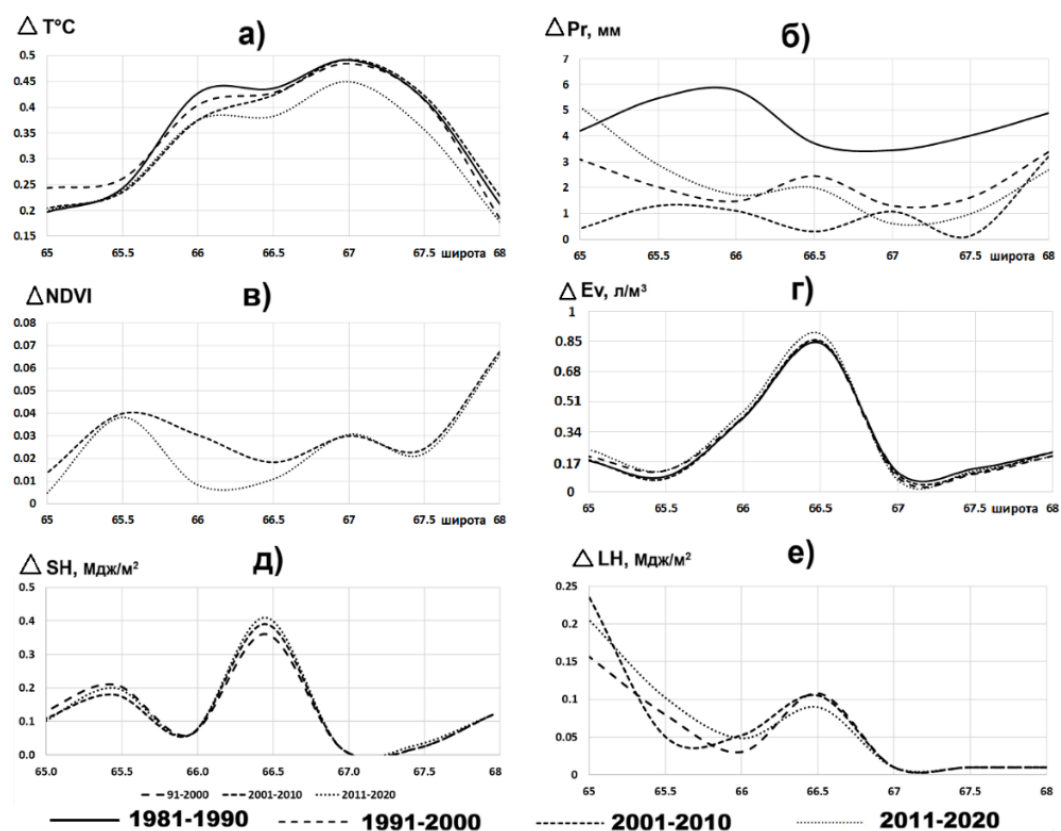


Рис. 18. Изменение широтных градиентов климатических параметров на меридиане 55° в.д. (Большеземельская тундра), по десятилетиям (1981–1990, 1991–2000, 2001–2010, 2011–2020 гг.) на 0.5° широты: а) температуры; б) осадков (данные WATCH); в) NDVI (данные MODIS); г) эвапотранспирации Ev (данные MERRA-2); д) поток явного тепла SH; е) потока скрытого тепла LH (данные ERA5-Land).

При рассмотрении средних по десятилетиям градиентов можно определить ключевую закономерность: положение климатического рубежа в Большеземельской тундре квазистационарно (рис. 18). Оси максимальных контрастов Tв, NDVI, Ev, SH, LH сохраняются в одном широтном интервале, демонстрируя высокую устойчивость. Напротив, градиенты осадков заметно меняются от десятилетия к десятилетию, смещаясь севернее или южнее. Интенсивность градиентов зависит от фоновых климатических условий. Однако наиболее стабильными и надёжными индикаторами положения зонально-климатического рубежа на севере ЕТР являются параметры подстилающей поверхности NDVI, Ev и тепло-влагообмена SH, LH. Они отражают долгосрочный отклик растительности на теплообеспеченность. Таким образом, NDVI, Ev, SH, LH не только чётко маркируют зональный климатический рубеж, но и делают это с большей временной надёжностью, что подтверждает их ключевую роль в мониторинге переходных зон в условиях меняющегося климата.

Анализ градиентов ключевых параметров выявил структуру переходной климатической зоны в средней тайге Западной Сибири. Температурный рубеж локализован в виде чёткой полосы градиентов $> 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 0.5° широты между 80–83° в.д., около 62° с.ш. Поле градиентов осадков практически не выражено. Переходная область чётко маркируется характеристиками подстилающей поверхности. Зона максимальных градиентов NDVI и Ev протягивается сплошной полосой между Обью и Енисеем. Поле повышенных градиентов тепло-влагообмена (SH, LH) смещено южнее на 0.5° широты от зоны наибольших

контрастов NDVI и Ev. Это подтверждает, что отклик растительности и тепло-влагообмена — более чувствительный индикатор переходной зоны, чем отдельные климатические параметры. В результате в Западной Сибири переходная зона проявляется не как резкий климатический разрыв, а как ландшафтно-экологический экотон. Её положение наиболее надёжно устанавливается по градиентам SH, LH, Ev и NDVI, формирующим сплошной широтный рубеж. Классические параметры либо не выявлены (осадки), либо дают локализованный сигнал (температура). Структура зоны визуализирована на комплексной схеме (рис. 19), интегрирующей линии максимальных градиентов с их стандартным отклонением Tв, SH, LH, NDVI, Ev. Зонально-климатический рубеж представляет собой целостную широтную полосу в коридоре между Обью и Енисеем, приуроченную к области повышенной повторяемости циклонов вдоль вторичной ветви АФ как основного фактора контрастов температуры, влажности и растительности.

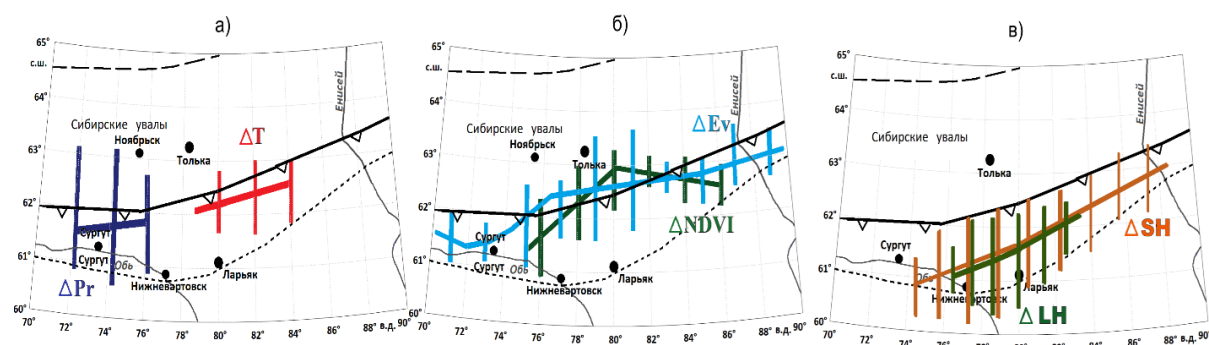


Рис. 19. Климатический рубеж среднетаёжной зоны Западной Сибири.

Максимальные градиенты с их доверительными интервалами, июль, 2000–2020 гг.:

- а) климатических параметров (красный — максимальные градиенты Tв, темно-синий — осадков Pr); б) спектральных параметров (зелёный — максимальные градиенты NDVI, голубой — Ev); в) теплообмена (оранжевый — поток явного тепла LH, темно-зелёный — поток скрытого тепла LH).

Рассмотрение меридиональных градиентов параметров вдоль 80° в.д. позволило локализовать ядро переходной зоны. Максимумы градиентов температуры воздуха, явного тепла и эвапотранспирации приурочены к 62.5° с.ш., тогда как пики градиентов скрытого тепла и вегетационного индекса смещены на 0.5° к северу — к 63° с.ш. Это смещение свидетельствует о сложной внутренней структуре климатического рубежа, где тепловые и спектральные характеристики поверхности реагируют на смену зональных условий с различной чувствительностью (рис. 20). Эвапотранспирация изменяется синхронно с турбулентными тепловыми потоками, что указывает на их тесную связь в системе «поверхность — атмосфера». Напротив, фитомасса, как более инерционная система, интегрирует условия более длительного периода, поэтому её градиенты смещены относительно тепловых.

В итоге переходная зона в Западной Сибири представляет собой чёткий широтный экотон, локализованный в среднетаёжных ландшафтах в интервале 62–63° с.ш. Его формирование обусловлено вторичной ветвью Арктического фронта и связанной с ней циклонической активностью, что создаёт повышенные горизонтальные контрасты термических и влажностных условий. Наиболее информативным индикатором зоны служит совокупность градиентов температуры воздуха, турбулентных потоков явного и скрытого тепла, эвапотранспирации и вегетационного индекса.

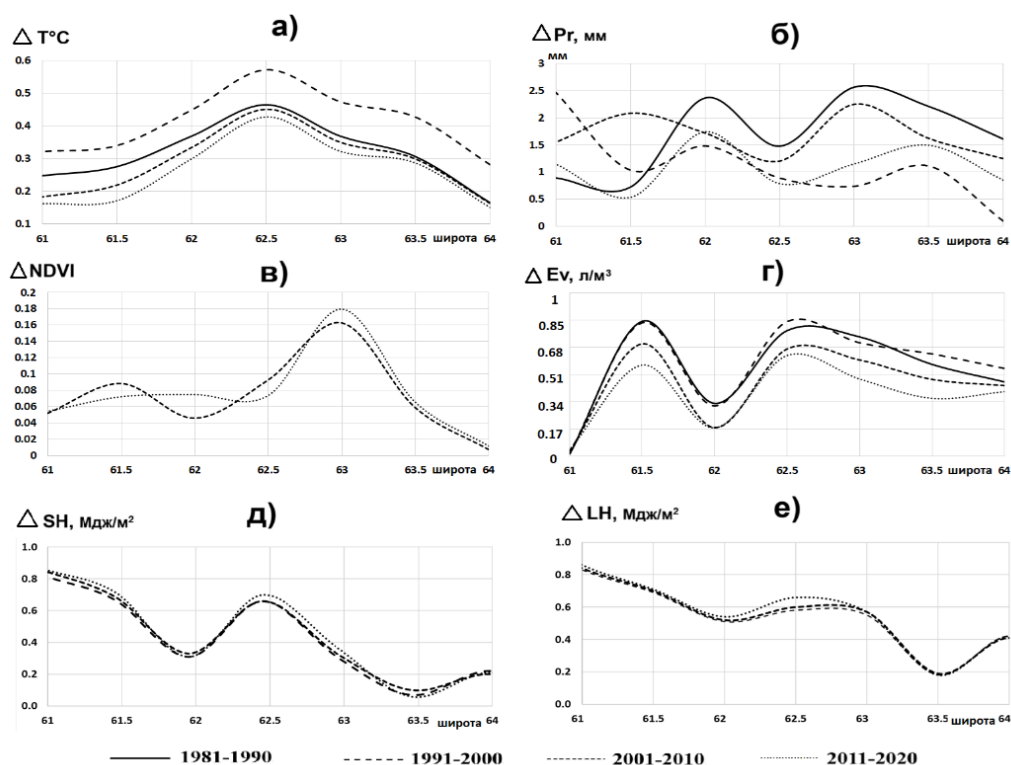


Рис. 20. Изменение широтных градиентов на меридиане 80° в.д. в среднетаёжной зоне 3С по десятилетиям на 0.5° широты: а) температуры Тв; б) осадков Pr; в) NDVI; г) эвапотранспирации Ev; д) потока явного тепла SH; е) потока скрытого тепла LH, июль.

Положение максимумов рассмотренных градиентов параметров демонстрирует высокую пространственную устойчивость от десятилетия к десятилетию, что позволяет говорить о квазистационарности зоны как о структурном элементе климатической системы региона. При этом в Западной Сибири градиенты эвапотранспирации оказались более чувствительными к климатическим флуктуациям, чем на ЕТР. Это связано с большей континентальностью западносибирского региона, где испарение более резко реагирует на изменения температуры и влажности воздуха. В зависимости от фоновых климатических условий конкретного периода абсолютные значения градиентов могут существенно усиливаться или ослабевать, хотя их широтная привязка остаётся устойчивой.

Таким образом, временная динамика переходной зоны среднетаёжной зоны Западной Сибири определяется балансом двух разнонаправленных тенденций: с одной стороны — устойчивым широтным положением зоны максимальных градиентов всех рассмотренных параметров, с другой — изменением их интенсивности, модулируемой циркуляционными условиями конкретного десятилетия.

Ещё одна переходная климатическая зона на юге ЕТР формируется под влиянием крупномасштабных процессов атмосферной циркуляции и местных механизмов обратной связи. Она представляет собой естественную полосу качественных изменений степных ландшафтов на сухостепные на относительно коротких расстояниях. Индикаторами южной переходной зоны являются повышенные градиенты Тв, Pr, NDVI, SH, LH и изменение Ev (рис. 21). На территориях с дефицитом влаги, к которым относится степная зона, ведущим индикатором климатического рубежа предпочтительнее использовать осадки. Достоверность выделения зоны подтверждается пространственным сопряжением

максимумов климатических градиентов с границами ландшафтов согласно ландшафтно-экологическому районированию России. Стабильность положения этой зоны во времени сочетается с изменчивостью её интенсивности. Также как в других переходных зонах равнин России в зависимости от фоновых климатических условий значения максимальных градиентов ключевых параметров (прежде всего осадков) могут существенно усиливаться или ослабевать.

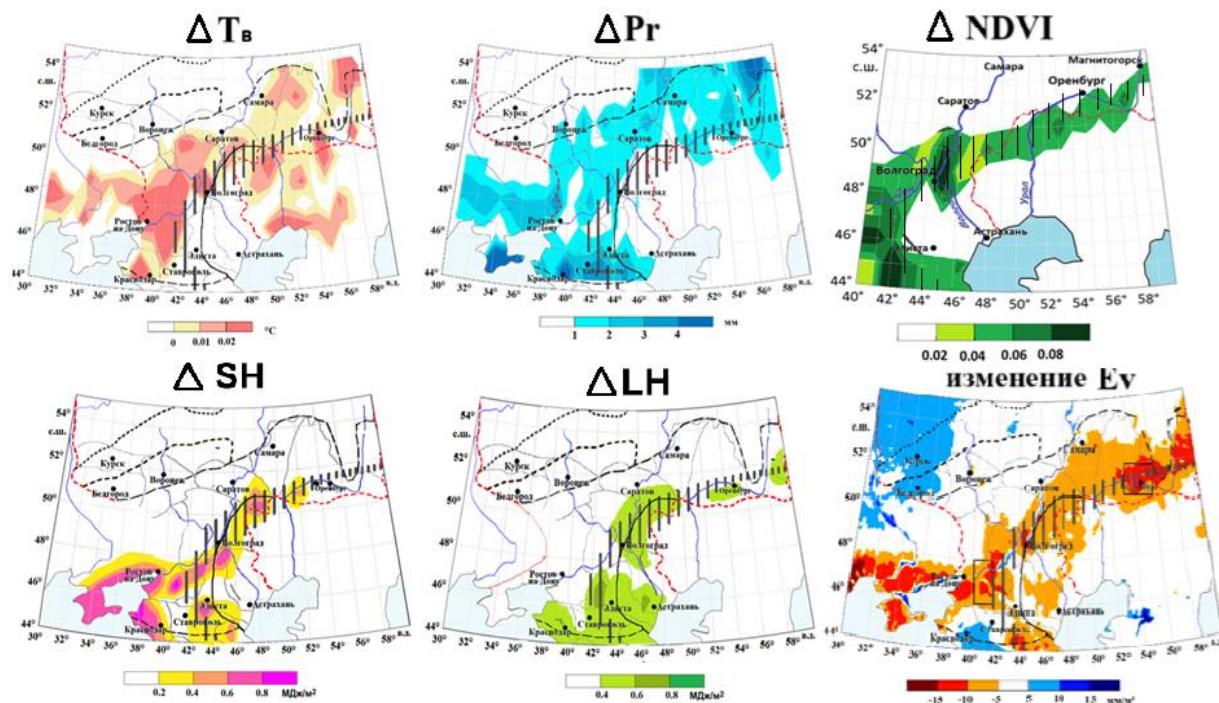


Рис. 21. Градиенты параметров, июль, 1991–2020 гг. (данные ERA5-Land): температуры T_v , осадков Pr , NDVI, потоков явного тепла SH , скрытого тепла LH и изменение эвапотранспирации Ev , периоды (1991–2020) — (1961–1990) гг., мм/м², с выделенной южной переходной климатической зоной (штриховка).

В период 1991–2020 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. в районе южной переходной зоны ЕТР выявлены значимые климатические изменения с перестройкой влагопереноса. Произошло усиление потоков дивергенции влаги в степных ландшафтах и формирование зоны отрицательной дивергенции в сухостепных ландшафтах переходной зоны. Наблюдаемый рост летних осадков в подтаёжных и широколиственно-лесных ландшафтах и усиление аридизации к югу со снижением влагообеспеченности, ростом засухливости и увеличением риска засух вызвали усиление контрастности параметров. В степных ландшафтах усилились горизонтальные градиенты температуры. Влажность почвы в наибольшей степени определялась ростом температуры, что вызвало иссушение почв. Данные по эвапотранспирации и NDVI подтверждают иссушение и снижение продуктивности в сухостепных ландшафтах. Наиболее сильный отклик на изменения климата проявился именно в сухостепных ландшафтах. Эта зона подтвердила свою роль активного климатического рубежа, где сфокусировано влияние изменений влагопереноса на подстилающую поверхность. Эти тенденции согласуются с крупномасштабными изменениями циркуляции, характеризующиеся ослаблением зонального переноса в Атлантико-Европейском секторе, ростом повторяемости блокирующих антициклонов на

востоке Восточно-Европейской равнины (Черенкова и др., 2020). Таким образом, южная переходная зона выступает не только как граница степных и сухостепных ландшафтов, но и как чувствительный индикатор и ключевой регион современных климатических изменений.

В качестве итогового примера эффективности комплексного подхода к переходным климатическим зонам рассмотрим структуру зонально-климатического рубежа в степной части Оренбургской области — территории с высокой контрастностью климатических и спектральных параметров (рис. 22). Интегрированный рубеж локализуется к югу от Оренбурга, в пределах распаханной разнотравно-ковыльной и типчаково-ковыльной степи. Его формирование обусловлено пространственным совпадением максимумов градиентов T_v , P_r , турбулентных потоков (SH , LH) и $NDVI$. Рубеж совпадает с областями максимальных изменений между периодами 1961–1990 и 1991–2020 гг. интегральных показателей дивергенции влаги (индикатор перестройки циркуляции и влагопереноса), эвапотранспирации и влажности верхнего слоя почвы. Таким образом, в Оренбургской области зонально-климатический рубеж представляет собой активную динамическую границу, где климатические тренды и их экологические последствия проявляются максимально сильно. Это делает его ключевым объектом для мониторинга и оценки климатических рисков в степной зоне.

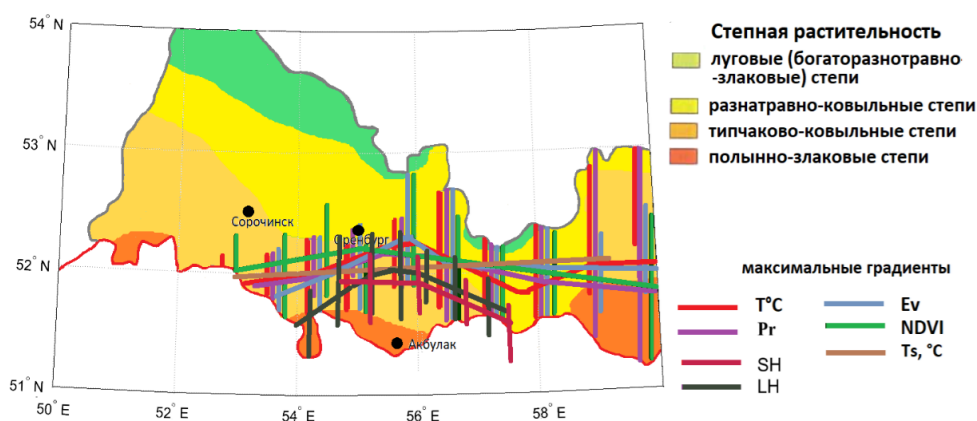


Рис. 22. Климатический рубеж в Оренбургской области, максимальные градиенты климатических параметров с их доверительными интервалами на карте растительности (Географический..., 1999), июль, 1981–2018 гг.

В результате наиболее стабильными индикаторами квазистационарных зонально-климатических рубежей (зон максимальной контрастности климатических характеристик) в Большеземельской тундре, в зоне средней тайги Западной Сибири и в сухостепной зоне ЕТР являются горизонтальные градиенты потоков явного и скрытого тепла, вегетационного индекса и эвапотранспирации, интенсивность которых модулируется климатическими условиями. В результате впервые определена целостная картина пространственно-временной структуры зонально-климатических рубежей на основе летней контрастности климатических параметров, тепло-влагообмена и характеристик поверхности, что даёт основу для мониторинга и прогнозирования смещения климатических границ природных зон в условиях современных изменений климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на обширные исследования изменения климата в последние десятилетия, региональные особенности трансформации турбулентного тепло- и влагообмена остаются недостаточно изученными в зависимости от темпов глобального потепления.

Диссертационная работа посвящена решению крупной научной проблемы – комплексному определению пространственно-временной климатической изменчивости природных зон равнин России под влиянием глобального потепления и динамики ОЦА, а также связанных с этими изменениями турбулентного тепло-влагообмена и свойств поверхности в тёплый период первой четверти XXI века. Дополнительно обоснована методика дешифрирования ареалов с деградированной растительностью природного и антропогенного происхождения по данным спутникового мониторинга. Проведена оценка пространственно-временной динамики переходных климатических зон с выделением зонально-климатических рубежей.

Рассмотрены теоретические аспекты взаимодействия подстилающей поверхности с атмосферой в природных зонах. Обозначены направления исследований взаимодействия подстилающей поверхности с атмосферой (глава 1). Использовались архивы данных (наблюдения, реанализ, данные дистанционного зондирования, циркуляционные индексы). Применялись методы статистической обработки баз данных в пакете анализа MATLAB, для которого были написаны специальные программы (глава 2). Даны количественные оценки изменений климатических режимов природных зон с середины XX века и оценки уровня климатической изменчивости природных зон равнин России в первой четверти XXI века (глава 3). Установлена пространственно-временная структура летнего тепло-влагообмена и его изменений в первой четверти XXI столетия относительно второй половины XX века в природных зонах ЕТР и Западной Сибири с выделением региональных энергоактивных зон на основе контрастности тепло-влагообмена (глава 4). Рассмотрено влияние географического положения Арктического и Полярного фронтов, интенсивности фронтальных процессов, колебания общей циркуляции атмосферы (на основе динамики циркуляционных мод), температуры поверхности океана (ТПО) северной Атлантики, температуры воздуха на климатическую изменчивость тепло-влагообмена в природных зонах равнин России (глава 5). Определён диапазон, сочетание и пространственно-временная динамика характеристик подстилающей поверхности Al , T_s , $NDVI$ и исследована их связь с климатическими параметрами, особенностями турбулентного тепло-влагообмена в тёплый период первой четверти XXI века в природных зонах ЕТР и Западной Сибири (глава 6). Представлена и обоснована методика выявления ареалов с деградированной или отсутствующей растительностью

природного и антропогенного происхождения на основе определения типа терморегуляции поверхности с использованием данных спутникового мониторинга (глава 7). Выявлена и проанализирована пространственно-временная динамика переходных климатических зон с зонально-климатическими рубежами в субарктической зоне ЕТР, бореальной зоне Западной Сибири и суббореальной зоне ЕТР (глава 8). Решение поставленных задач позволило оценить потенциальные последствия современного изменения климата для природных экосистем.

Таким образом, работа представляет собой многоаспектный анализ, связывающий глобальные климатические тренды с региональными изменениями тепло-влагообмена, состоянием растительного покрова и структурой климатических зон. Полученные результаты и разработанный методический аппарат вносят вклад в понимание механизмов климатической трансформации природных зон России и формируют основу для их мониторинга и оценки уязвимости.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В начале XXI века по сравнению со второй половиной XX столетия зафиксированы повышения среднегодовой температуры, температуры января и июля, суммы температур выше 10 °С, а также пространственно разнонаправленные тренды осадков.
2. Климатические сдвиги привели к изменению климатических режимов в южных секторах природных зон равнин России (от тундры до сухой степи), где значения стали соответствовать более южным ландшафтам. Данный факт указывает на частичную климатическую трансформацию природных зон.
3. Трансформация тепло-влагообмена равнин России в 1991-2020 гг характеризуется повсеместным ростом восходящих потоков явного тепла относительно 1961-1990 гг (от 2% в субарктике ЕТР до 17% в суббореальной зоне ЕТР), ростом турбулентных потоков скрытого тепла в субарктической и бореальной зонах (2–10%) и их снижением в суббореальной зоне (до –6%), а также значимым положительным ростом баланса тепло-влагообмена (отношение Боуэна) на 24% в суббореальной зоне ЕТР.
4. Бореальные леса и сухие степи являются региональными энергоактивными зонами с повышенной горизонтальной контрастностью турбулентного тепло-влагообмена до 1 МДж в ячейке 1°×1° по широте и долготе и в начале XXI века распространяются к северу, формируя новые ареалы в субарктической зоне – от таёжной зоны до зоны тундр, в суббореальной – от сухостепной зоны до лесостепи.

5. Пространственно-временная изменчивость климатического режима и тепло-влажгообмена равнин России в начале XXI века определяется квазистационарным положением и увеличением циклонической активности с ростом градиентов приземной температуры и осадков на Арктическом и Полярном фронтах.
6. Изменение преобладающих фаз мод атмосферной циркуляции (АО с отрицательной на положительную, а SCAND и EAWR с положительной на отрицательную) в начале XXI века приводит к ослаблению зонального переноса и увеличению блокирующих антициклонов, что в свою очередь влияет на трансформацию турбулентных потоков тепло-влажгообмена.
7. Характеристики поверхности (вегетационный индекс, альbedo и радиационная температура) находятся в динамичном взаимодействии с климатом и процессами тепло-влажгообмена.
8. В первой четверти XXI века изменение климата вызывает в субарктике рост вегетационного индекса, что сопровождается ростом радиационной температуры и разнонаправленным трендом альbedo поверхности. В бореальной зоне наблюдается рост фитомассы при снижении радиационной температуры и незначимом изменении альbedo. В суббореальной зоне повышение приповерхностной температуры воздуха, снижение увлажнённости и рост аридизации приводят к уменьшению фитомассы, увеличению радиационной температуры и мозаичному изменению альbedo поверхности на фоне усиливающейся антропогенной нагрузки.
9. Объективное выявление деградированных ареалов природных зон методами спутникового мониторинга основано на выявлении механизма терморегуляции подстилающей поверхности по направленности связи альbedo поверхности – радиационная температура. Радиационный механизм определяется по отрицательной связи, а эвапотранспирационный – по положительной.
10. Ареалы с радиационным типом терморегуляции поверхности служат индикаторами деградации поверхности и выявляются во всех природных зонах. Рост их площади обусловлен комплексным воздействием неблагоприятных климатических условий и антропогенной деятельности.
11. Переходные климатические зоны с зонально-климатическими рубежами определяются на основе контрастности показателей Tв, Pr, SH, LH, NDVI, Ev.
12. Зонально-климатические рубежи представляют собой квазистационарные образования, интенсивность которых модулируется климатическими условиями и служат важным инструментом для мониторинга состояния и динамики переходных экосистем равнин России.

В итоге в первой четверти XXI века на равнинах России установлена частичная климатическая трансформация природных зон (южные участки зон приобрели климат более южных ландшафтов) и перестройка летнего турбулентного тепло-влагообмена: повсеместный рост явного тепла, разнонаправленная динамика скрытого тепла. Изменения обусловлены потеплением, ослаблением зонального переноса, активизацией фронтов. Бореальные леса и сухие степи являются зонами высокой контрастности теплообмена и могут быть обозначены как региональные энергоактивные зоны. Альbedo поверхности, радиационная температура и вегетационный индекс устойчиво связаны с тепло-влагообменом в пространственном диапазоне от подтаёжной зоны до полупустыни. Связь альbedo и радиационной температуры является индикатором ареалов с деградированной растительностью. Атмосферная циркуляция, турбулентный обмен, растительный покров формируют единый квазистационарный зонально-климатический рубеж в Большеземельской тундре, в зоне средней тайги Западной Сибири и в сухостепной зоне ЕТР с климатически обусловленной изменчивостью их интенсивности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК и в базах данных Web of Science, Scopus.

1. **Титкова Т.Б.,** Золотокрылин А.Н. Проявление летнего потепления в изменениях спектральных характеристик поверхности природных зон России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 3. С. 193–206. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-193-206. *Web of Science, Scopus: 3, Белый список: 2, ЕГПНИ: 1, ВАК*
2. **Титкова Т.Б.,** Золотокрылин А.Н. Влияние изменений крупномасштабной атмосферной циркуляции на летние вертикальные потоки тепло- и влагообмена в ландшафтных зонах равнин России // Метеорология и гидрология. 2024. № 6. С. 26–39. DOI: 10.52002/0130-2906-2024-6-26-39. *Web of Science, Scopus, Белый список: 2, ЕГПНИ: 2, ВАК*
3. Виноградова В.В., **Титкова Т.Б.** Климатические предпосылки изменений границ ландшафтных зон равнин России // Известия РАН. Серия географическая. 2024. № 3. С. 281–295. DOI: 10.31857/S2587556624030027. *Scopus, Белый список: 2, ЕГПНИ: 1, ВАК*
4. **Титкова Т.Б.,** Золотокрылин А.Н., Тарасова М.А. Взаимосвязь турбулентного тепло-влагообмена и NDVI в различных ландшафтных зонах равнин России в летний период // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 219–231. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-219-231. *Web of Science, Scopus: 3, Белый список: 2, ЕГПНИ: 1, ВАК*
5. Виноградова В.В., **Титкова Т.Б.** Устойчивость ландшафтов Калмыкии и Дагестана к долговременным изменениям климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 188–199. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-188-199. *Web of Science, Scopus: 3, Белый список: 2, ЕГПНИ: 1, ВАК*

6. **Титкова Т.Б.,** Золотокрылин А.Н. Климат зональных ландшафтов равнин России при современном глобальном потеплении в летний период // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 3. С. 391–402. DOI: 10.31857/S2587556623030111. *Scopus, Белый список: 2, ЕГПНИ: 1, ВАК*
7. **Titkova T.B.,** Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A. Modern climate trends in evaporation changes and soil humidity in the south of European Russia // *Arid Ecosystems*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 239–248. DOI: 10.1134/S2079096123030150. *Web of Science, Scopus, Белый список: 2, ЕГПНИ: 2, ВАК: 1*
8. **Titkova T.B.,** Zolotokrylin A.N. Circulation-related causes of changes in the heat-mass exchange in West-Siberian subarctic in the period of summer warming: case study of Yamalo-Nenets autonomous okrug // *Water Resources*. 2023. Vol. 50. No. S3. pp. S333–S337. DOI: 10.1134/S0097807823700549. *Web of Science: 4, Scopus: 3, Белый список: 2, ВАК*
9. **Титкова Т.Б.,** Золотокрылин А.Н. Пространственная неоднородность летнего турбулентного теплообмена на равнинах России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2023. № 4. С. 467–481. DOI: 10.21513/2410-8758-2023-4-467-481. *ЕГПНИ: 2, ВАК: 1*
10. **Титкова Т.Б.,** Золотокрылин А.Н., Тарасова М.А. Летние изменения соотношения тепла и влаги в сельскохозяйственных районах юга России при современном потеплении // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 9. С. 72–85. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-9-72-85. *Web of Science, Scopus, Белый список: 2, ЕГПНИ: 2, ВАК*
11. Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., **Титкова Т.Б.** Роль весенне-летних засух в динамике аридизации засушливых земель европейской территории России // *Известия РАН. Серия географическая*. 2022. Т. 86. № 1. С. 98–108. DOI: 10.31857/S2587556622010137. *Scopus, Белый список: 2, ЕГПНИ: 1, ВАК*
12. **Титкова Т.Б.,** Золотокрылин А.Н. Летние климатические изменения на юге Европейской России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2022. Т. 8. № 1. С. 107–121. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-1-107-121. *ЕГПНИ: 2, ВАК: 1*
13. **Титкова Т.Б.,** Золотокрылин А.Н. Мониторинг подверженных опустыниванию земель Республики Калмыкия // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 2. С. 130–141. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-130-141. *Web of Science, Scopus: 3, Белый список: 2, ЕГПНИ: 1, ВАК*
14. **Титкова Т.Б.,** Золотокрылин А.Н. Региональная неравномерность летнего потепления материковой Арктики // *Арктика: экология и экономика*. 2021. Т. 11. № 3. С. 386–396. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-386-396. *Scopus: 2, Белый список: 1, ЕГПНИ: 1, ВАК: 1*
15. **Титкова Т.Б.,** Золотокрылин А.Н. Климатическая переходная зона севера России в летних условиях // *Известия РАН. Серия географическая*. 2021. Т. 85. № 5. С. 714–725. DOI: 10.31857/S2587556621040142. *Scopus, Белый список: 2, ЕГПНИ: 1, ВАК*
16. **Титкова Т.Б.,** Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В. Климатический рубеж в Северном Прикаспии: индикаторы и размещение // *Известия РАН. Серия географическая*. 2020. Т. 84. № 6. С. 864–873. DOI: 10.31857/S2587556620050167. *Scopus, Белый список: 2, ЕГПНИ: 1, ВАК*
17. Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., **Титкова Т.Б.** (а) Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // *Известия РАН. Серия географическая*. 2020. Т. 84. № 2. С. 207–217. DOI: 10.31857/S258755662002017X. *Scopus, Белый список: 2, ЕГПНИ: 1, ВАК*

18. Zolotokrylin A., Brito-Castillo L., **Titkova T.** Monitoring of the "island" of desertification in Sonora in the 21st century // *Journal of Arid Environments*. 2020. Vol. 178. 104147. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2020.104147. *Web of Science*: 2, *Scopus*: 1
19. **Титкова Т.Б.**, Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В. Спектральные характеристики тундровых и лесотундровых ландшафтов в годы летних температурных аномалий // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2020. № 4. С. 88–104. DOI: 10.21513/2410-8758-2020-4-88-104. *ЕГПНИ*: 2, *ВАК*: 1
20. Золотокрылин А.Н., **Титкова Т.Б.**, Черенкова Е.А. (б) Характеристики весенне-летних засух в сухие и влажные периоды на юге Европейской России // *Аридные экосистемы*. 2020. Т. 10. № 4. С. 76–83. *Web of Science*, *Scopus*, *Белый список*: 2, *ЕГПНИ*: 2, *ВАК*: 1
21. **Титкова Т.Б.**, Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В. Спектральный портрет равнинных ландшафтов России // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 3. С. 117–126. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-117-126. *Web of Science*, *Scopus*: 3, *Белый список*: 2, *ЕГПНИ*: 1, *ВАК*
22. **Титкова Т.Б.**, Виноградова В.В. Изменения климата в переходных природных зонах севера России и их проявление в спектральных характеристиках ландшафтов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 5. С. 310–323. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323. *Web of Science*, *Scopus*: 3, *Белый список*: 2, *ЕГПНИ*: 1, *ВАК*
23. Золотокрылин А.Н., Бажа С.Н., **Титкова Т.Б.**, Сыртыпова С.-Х.Д. Тренды поголовья скота и спектральных характеристик поверхности пастбищ (на примере среднегобийского аймака Монголии) // *Аридные экосистемы*. 2018. Т. 24. № 3 (76). С. 3–10. *Web of Science*, *Scopus*, *Белый список*: 2, *ЕГПНИ*: 2, *ВАК*: 1
24. Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., **Titkova T.B.** Bioclimatic subhumid zone of Russia plains: droughts, desertification, and land degradation // *Arid Ecosystems*. 2018. Vol. 8. No. 1. pp. 7–12. DOI: 10.1134/S2079096118010140. *Web of Science*, *Scopus*, *Белый список*: 2, *ЕГПНИ*: 2, *ВАК*: 1
25. Золотокрылин А.Н., **Титкова Т.Б.** Смягчение засушливости климата Приволжской степи в 2000–2007 гг., выявленное с помощью спутниковых данных // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 7. С. 128–135. *Web of Science*, *Scopus*: 3, *Белый список*: 2, *ЕГПНИ*: 1, *ВАК*
26. Zolotokrylin A.N., Gunin P.D., **Titkova T.B.**, Baja C.N., Kazantseva T.I. Diagnosis of the desertification dynamics of arid pastures in Mongolia from observation in key areas and MODIS data // *Arid Ecosystems*. 2016. Vol. 6. No. 3. pp. 153–160. DOI: 10.1134/S2079096116030134. *Web of Science*, *Scopus*, *Белый список*: 2, *ЕГПНИ*: 2, *ВАК*: 1
27. Zolotokrylin A.N., **Titkova T.B.**, Cherenkova E.A., Vinogradova V.V. Dynamics of summer moistening and biophysical parameters of arid pastures in the European part of Russia in 2000–2014 // *Arid Ecosystems*. 2016. Vol. 6. No. 1. pp. 1–7. *Web of Science*, *Scopus*, *Белый список*: 2, *ЕГПНИ*: 2, *ВАК*: 1
28. Михайлов А.Ю., Золотокрылин А.Н., **Титкова Т.Б.** Положение арктического фронта в периоды похолодания и потепления Арктики // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56. № 4. С. 493–501. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-4-493-501. *Web of Science*: 4, *Scopus*: 3, *Белый список*: 2, *ЕГПНИ*: 1, *ВАК*

29. Zolotokrylin A.N., **Titkova T.B.**, Brito-Castillo L. Wet and dry patterns associated with ENSO events in the Sonoran Desert from 2000–2015 // *Journal of Arid Environments*. 2016. Vol. 134. pp. 21–32. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2016.06.007. *Web of Science, Scopus, Белый список: 2, ЕГПНИ: 2, ВАК: 1*
30. Виноградова В.В., **Титкова Т.Б.**, Черенкова Е.А. Динамика увлажнения и теплообеспеченности в переходных ландшафтных зонах по спутниковым и метеорологическим данным в начале XXI века // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 2. С. 162–172. *Web of Science, Scopus: 3, Белый список: 2, ЕГПНИ: 1, ВАК*
31. Tereshchenko I., Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Monzón C.O., Brito-Castillo L., **Titkova T.B.** Changes in aridity across Mexico in the second half of the twentieth century // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2015. Vol. 54. No. 10. pp. 2047–2062. *Web of Science: 2, Scopus: 1*
32. Золотокрылин А.Н., **Титкова Т.Б.**, Черенкова Е.А., Виноградова В.В. Тренды увлажнения и биофизических параметров засушливых земель Европейской части России за период 2000–2014 гг. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 2. С. 155–161. *Web of Science, Scopus: 3, Белый список: 2, ЕГПНИ: 1, ВАК*
33. **Титкова Т.Б.**, Виноградова В.В. Отклик растительности на изменение климатических условий в бореальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 3. С. 75–86. *Web of Science, Scopus: 3, Белый список: 2, ЕГПНИ: 1, ВАК*
34. **Титкова Т.Б.**, Виноградова В.В., Михайлов А.Ю. Климатические вариации арктического фронта в теплый период и их проявления в северных ландшафтах // *Известия РАН. Серия географическая*. 2015. № 4. С. 39–46. *Scopus, Белый список: 2, ЕГПНИ: 1, ВАК*
35. Черенкова Е.А., **Титкова Т.Б.**, Михайлов А.Ю. Сезонные особенности арктического фронта на территории России в XX и XXI веках // *Криосфера Земли*. 2014. Т. 18. № 4. С. 78–85. *Scopus: 3, Белый список: 2, ЕГПНИ: 2*
36. Золотокрылин А.Н., Трофимов И.А., **Титкова Т.Б.** Оценка экологического состояния «норма» аридных пастбищ по геоботаническим и MODIS данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 2. С. 197–207. *Web of Science, Scopus: 3, Белый список: 2, ЕГПНИ: 1, ВАК*
37. Золотокрылин А.Н., **Титкова Т.Б.**, Черенкова Е.А. Увлажнение засушливых земель Европейской территории России: настоящее и будущее // *Аридные экосистемы*. 2014. Т. 20. № 2 (59). С. 5–12. *Web of Science, Scopus, Белый список: 2, ЕГПНИ: 2, ВАК: 1*
38. **Титкова Т.Б.**, Михайлов А.Ю., Виноградова В.В. Арктический фронт и ледовитость Баренцева моря в зимний период // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 3. С. 117–125. *Web of Science, Scopus: 3, Белый список: 2, ЕГПНИ: 1, ВАК*
39. Золотокрылин А.Н., **Титкова Т.Б.**, Уланова С.С., Федорова Н.Л. Наземные и спутниковые исследования продуктивности пастбищ республики Калмыкии с различной степенью деградации растительных сообществ // *Аридные экосистемы*. 2013. Т. 19. № 4 (57). С. 31–39. *Web of Science, Scopus, Белый список: 2, ЕГПНИ: 2, ВАК: 1*

40. Золотокрылин А.Н., **Титкова Т.Б.**, Черенкова Е.А. Сравнительные исследования засух 2010 и 2012 гг. на Европейской территории России по метеорологическим и MODIS данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 246–253. *Web of Science*, *Scopus*: 3, *Белый список*: 2, *ЕГПНИ*: 1, *ВАК*
41. Tereshchenko I., Zolotokrylin A., **Titkova T.**, Brito-Castillo L., Monzon C.O. On seasonal variation of surface temperature-modulating factors in the Sonoran Desert, North-West Mexico // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2012. Vol. 51. pp. 1519–1530. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-0160.1. *Web of Science*: 2, *Scopus*: 1
42. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б. Спутниковый индекс климатических экстремумов засушливых земель // *Аридные экосистемы*. 2012. Т. 18. № 4 (53). С. 5–12. *Web of Science*, *Scopus*, *Белый список*: 2, *ЕГПНИ*: 2, *ВАК*: 1
43. Золотокрылин А.Н., **Титкова Т.Б.**, Черенкова Е.А., Виноградова В.В. Спутниковый индекс для оценки климатических экстремумов на засушливых землях (на примере Кума-Манычской впадины) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 114–122. *Web of Science*, *Scopus*: 3, *Белый список*: 2, *ЕГПНИ*: 1, *ВАК*
44. Михайлов А.Ю., Золотокрылин А.Н., **Титкова Т.Б.** Полярный фронт над равнинами России летом // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 2. С. 24–29. *Web of Science*, *Scopus*, *Белый список*: 2, *ЕГПНИ*: 2, *ВАК*
45. Золотокрылин А.Н., **Титкова Т.Б.** Новый подход к мониторингу очагов опустынивания // *Аридные экосистемы*. 2011. Т. 17. № 3 (48). С. 14–22. *Web of Science*, *Scopus*, *Белый список*: 2, *ЕГПНИ*: 2, *ВАК*: 1
46. Золотокрылин А.Н., Михайлов А.Ю., **Титкова Т.Б.** Полярный фронт и контрастность степной растительности Европейской России // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. М., 2011. Т. 24. С. 295–306. *РИНЦ*, *ВАК (доктор наук) 2001–2005*
47. Золотокрылин А.Н., **Титкова Т.Б.** Тенденция опустынивания Северо-Западного Прикаспия по MODIS данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 217–225. *Web of Science*, *Scopus*: 3, *Белый список*: 2, *ЕГПНИ*: 1, *ВАК*
48. Золотокрылин А.Н., **Титкова Т.Б.** Климатообусловленная динамика лесостепной, степной и полупустынной растительности России и Казахстана // *Известия РАН. Серия географическая*. 2010. № 2. С. 40–48. *Scopus*, *Белый список*: 2, *ЕГПНИ*: 1, *ВАК*
49. Золотокрылин А.Н., **Титкова Т.Б.** Климатический фактор динамики растительности засушливых земель Европейской территории России // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. М.: ИГКЭ, 2009. Т. 22. С. 79–91. *РИНЦ*, *ВАК (доктор наук) 2001–2005*
50. Черенкова Е.А., **Титкова Т.Б.** Изменение увлажнения суббореальных равнинных ландшафтов России в условиях глобального потепления // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. СПб.: Гидрометеиздат, 2009. Т. 22. С. 66–80. *РИНЦ*, *ВАК (доктор наук) 2001–2005*
51. Золотокрылин А.Н., Коняев К.В., Виноградова В.В., **Титкова Т.Б.** Пространственное изменение связи между аномалиями NDVI и соотношением тепла и влаги на равнинах России // *Исследование Земли из космоса*. 2007. № 1. С. 66–73. *Scopus*: 4, *Белый список*: 3, *ЕГПНИ*: 1, *ВАК*: 1

ГЛАВЫ В МОНОГРАФИЯХ

1. Эдельгериев Р.С.Х., Иванов А.Л., Донник И.М., ... **Титкова Т.Б.** и др. Глобальный климат и почвенный покров России. Проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство) / Том 3. Москва, 2021. 700 с. DOI: 10.52479/978-5-6045103-9-1
2. Золотокрылин А.Н., **Титкова Т.Б.**, Черенкова Е.А., Кухта А.Е., Попова Е.Н. Динамика засушливости: обзор индикаторов для оценки трендов на субрегиональном уровне / В книге: Деградация земель и опустынивание в России: Новейшие подходы к анализу проблемы и поиску путей решения. Москва, 2019. С. 113–120.
3. Куст Г.С., Кудерина Т.М., Андреева О.В., Суслowa С.Б., ... **Титкова Т.Б.** и др. Информационная поддержка, мониторинг и основные показатели, используемые на национальном уровне в области предупреждения и борьбы с ОДЗЗ / В книге: Деградация земель и опустынивание в России: Новейшие подходы к анализу проблемы и поиску путей решения. Москва, 2019. С. 165–168.
4. Иванов А.Л., Куст Г.С., Донник И.М., Бедрицкий А.И., Багиров В.А., ... **Титкова Т.Б.** и др. Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство) / Национальный доклад 2. Москва, 2019. 476 с.
5. Бокучава Д.Д., Бородинa Т.Л., Виноградова В.В., Глезер О.Б., Золотокрылин А.Н., Соколов И.А., **Титкова Т.Б.**, Черенкова Е.А., Ширяева А.В. / Природно-климатические условия и социально-географическое пространство России. Москва, 2018. 154 с. DOI: 10.15356/ncsgsrus
6. Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В., **Титкова Т.Б.**, Черенкова Е.А., Бокучава Д.Д. Климатические аномалии и экстремальные события на территории России / В книге: Природно-климатические условия и социально-географическое пространство России. Москва, 2018. С. 7–59.
7. Золотокрылин А.Н., **Титкова Т.Б.** Диагностика динамики опустынивания аридных ландшафтов Монголии по MODIS данным / В книге: Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. Монография. В 5-ти томах. Под редакцией В.Г. Сычева, Л. Мюллера. Москва, 2018. С. 315–319. DOI: 10.25680/5277.2018.91.98.165
8. Виноградова В.В., **Титкова Т.Б.**, Белоновская Е.А., Грачева Р.Г. Анализ воздействия климатических изменений на горные ландшафты северного Кавказа / В книге: Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. Монография. В 5-ти томах. Москва, 2018. С. 214–218. DOI: 10.25680/5335.2018.60.49.23810.
9. Золотокрылин А.Н., **Титкова Т.Б.** Спутниковый индекс климатических экстремумов засушливых ландшафтов SCEI / В книге: Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. Монография. В 5-ти томах. Москва, 2018. С. 229–232. DOI: 10.25680/4063.2018.14.28.241

Титкова Татьяна Борисовна
«Изменения тепло-влагообмена и характеристик поверхности равнинных территорий
России в первой четверти XXI века»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора географических наук
Специальность 1.6.18 «Науки об атмосфере и климате»

Подписано в печать « » _____ 2026 г. Формат 60 x 84 1/16.

Печ. л. 2. Тираж 100 экз.

Заказ №

Типография _____