

На правах рукописи



Сафонова Мария Сергеевна

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И
ДИНАМИКИ НИЗКОГОРНЫХ СУБСРЕДИЗЕМНОМОРСКИХ ЛЕСНЫХ
ЛАНДШАФТОВ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА
(НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОГО КРЫМА)**

Специальность 1.6.21. Геоэкология

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук**

Севастополь – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»

**Научный
руководитель**

Горбунов Роман Вячеславович

доктор географических наук
директор ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»
(г. Севастополь)

**Официальные
оппоненты**

Бармин Александр Николаевич

доктор географических наук, профессор,
профессор кафедры экологии, природопользования,
землеустройства и безопасности
жизнедеятельности, ФГБОУ ВО «Астраханский
государственный университет имени
В.Н. Татищева» (г. Астрахань)

Янцер Оксана Васильевна

кандидат географических наук, доцент,
директор Института естествознания, физической
культуры и туризма, ФГАОУ ВО «Уральский
государственный педагогический университет»
(г. Екатеринбург)

**Ведущая
организация**

ФГБУН ФИЦ «Субтропический научный центр
Российской академии наук» (г. Сочи)

Защита состоится «25» декабря 2025 года на заседании объединенного совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук 99.0.075.03 при ФГБУН ФИЦ «Владикавказский научный центр РАН», ФГБОУ ВО «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова», ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова» по адресу: г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а (ГФИ ВНИЦ РАН).

Отзывы на автореферат (заверенные печатью, в двух экземплярах) просим направлять по адресу: 364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр. Х. Исаева, д. 100, на имя ученого секретаря диссертационного совета 99.0.075.03 З.Ш. Гагаевой. E-mail: geodissovets@mail.ru. Факс: 8 (8712) 22-36-07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ГГНТУ им. Академика М.Д. Миллионщикова» и на сайтах: https://gstou.ru/science/dissertation_council/ и vak.minobrnauki.gov.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 99.0.075.03,
к.г.н.

З. Ш. Гагаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Обоснование выбора темы и её актуальности. Функционирование ландшафтов определяется вещественно-энергетическим обменом между экосистемой и окружающей ее средой. Несмотря на достаточно продолжительную историю изучения этого вопроса в ландшафтоведении и геоэкологии, процесс вещественно-энергетического обмена в пределах ландшафта на региональном и локальном уровне до конца не изучен. В мире имеются разрозненные как в пространственном, так и во временном масштабах исследования в данной области и, как следствие, недостаточные и неравномерные данные, что объясняется сложностью проведения таких работ.

Изменение климата приводит к изменению структуры радиационного, теплового, водного и вещественного балансов геоэкосистем, трансформируя, таким образом, потоки вещества и энергии. При этом эти изменения формируют цепь событий, при развитии которой функциональные изменения приводят к структурным трансформациям в ландшафте.

Таким образом, актуальность исследования вытекает из необходимости и целесообразности сохранения природных ландшафтов, адаптации системы природопользования в условиях региональных проявлений изменения климата с целью достижения показателей устойчивого развития.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время активно исследуется изменение климата и последствия, которые оказывают эти изменения на функционирование лесных ландшафтов [Peñuelas et al., 2017; Nunes et al., 2021; Suárez-Muñoz et al., 2023; J. Peñuelas et al., 2017; L.J.R. Nunes et al., 2021; J.C. Pérez-Girón et al., 2020; D. Sousa и W. Davis Frank, 2020; Некляев С.Э., 2022; Фомин Э.С., 2023; Игнатов А.Н., 2020; Санданов Д.В., 2020; Миронова, 2020; Ermakov et al., 2021; Боков, 2010].

Функционирование лесных экосистем главным образом определяется радиационным, тепловым и водными балансами рассматриваемых ландшафтов [Арманд, 1975; Сочава, 1978; Солнцев, 1981; Fuchs et al., 2021; Беручашвили, 1990; Мамай, 1992; Njuki et al., 2023]. В Горном Крыму стоит отметить исследования И.П. Ведя [Ведь, 1971, 1974, 1978; Гаркуша, 2010; Боков, 2020; Бочарников, 2019; Горбунов, 2022].

В России влияние изменения климата на ландшафт рассматривают с точки зрения состояния растительности: распространение, болезни, фенологический отклик, адаптации и стрессоустойчивость [Акатов П.В., 2009; Игнатов А.Н., 2020; Санданов Д.В., 2020; Некляев С.Э., 2022; Фомин Э.С., 2023; Эчедеи Й.Й., 2005]. Зарубежные ученые пошли по другому пути, где на основе прогноза изменения климата моделируется состояние растительного сообщества [Leng W., 2007; Moriondo M., 2008].

Исследования в области формирования и функционирования лесных горных ландшафтов представляют собой активно развивающуюся область науки. Однако большинство отечественных исследований в этой области

склонны фокусироваться на региональном уровне, уделяя меньше внимания топологическим аспектам.

Цель исследования – изучить геоэкологические аспекты функционирования и динамики лесных ландшафтов субсредиземноморского низкогорья Юго-Восточного Крыма в условиях изменения климата.

Для достижения цели решались следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ изученности вопроса функционирования и динамики лесных ландшафтов в условиях изменения климата. Сформулировать теоретико-методологические подходы исследования функционирования и динамики лесных ландшафтов на топологическом уровне.

2. Описать физико-географические факторы формирования и условия функционирования низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов Юго-Восточного Крыма.

3. Выполнить анализ круговоротов вещества и энергии на основе радиационного, теплового и водного балансов различных типов низкогорных субсредиземноморских ландшафтов с учетом влияния особенностей рельефа крон.

4. Определить значения факторной энтропии и индекса Херста на основе вегетационного индекса NDVI, для выявления ландшафтных стратегий различных типов низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов в современных условиях климатических изменений.

5. На основе сценариев изменения климата и представлений о структуре и динамике лесных ландшафтов с использованием динамических моделей растительности спрогнозировать основные показатели состояния и функционирования пушистодубового и можжевельного лесов до конца XXI века.

Объект исследования – лесные ландшафты субсредиземноморского низкогорья Юго-Восточного Крыма.

Предмет исследования – особенности функционирования и динамики лесных ландшафтов субсредиземноморского низкогорья Юго-Восточного Крыма (на примере пушистодубовых и можжевельных лесов Карадагского заповедника).

Научная новизна.

1. Сформулирован комплексный подход в изучении процессов функционирования и динамики лесных ландшафтов на топологическом уровне в условиях изменения климата.

2. На основе данных мониторинговых измерений показаны пространственно-временные закономерности влияния кроны деревьев на распределение вещества и энергии в ландшафтах на локальном уровне.

3. На примере пушистодубового и можжевельного лесов выявлено влияние локальных факторов на особенности их функционирования и динамики в условиях изменения климата. Определены их индивидуальные стратегии согласно сценариям изменения климата.

4. На основе рассчитанных ландшафтных стратегий и моделей продемонстрировано влияние изменения климата на структуру и функционирование лесных ландшафтов, и сформирована теоретическая база для рационального природопользования.

Теоретическая значимость работы. В работе систематизирован накопленный отечественными и зарубежными учеными опыт изучения и проведения исследований функционирования лесных ландшафтов. На основании проведенных исследований получены новые представления, результаты и выводы, которые значительно углубляют понимание особенностей функционирования лесных ландшафтов и локальных особенностей, оказывающих на них влияние. Впервые для лесов юго-восточного Крыма была продемонстрирована роль кроны деревьев в распределении потоков вещества и энергии, а также динамика лесных ландшафтов на локальном уровне в условиях изменения климата.

Используемый в работе набор методов позволяет провести комплексное исследование, позволяющее расширить представление о влиянии локальных особенностей территории на климатические показатели, растительный покров и тенденции их изменения.

Практическая значимость работы. Используемый комплексный подход может быть эффективно применен для решения как теоретических, так и практических задач, связанных с изучением функционирования и динамики лесных ландшафтов в условиях изменения климата. Сочетание методик, основанных на открытых данных и доступных средствах геоинформационных систем (ГИС) вместе с натурными измерениями, расширяет возможности анализа реакции локальных ландшафтов на изменения. Это, в свою очередь, может стать основой для разработки адаптивных подходов к природопользованию в условиях изменяющейся окружающей среды.

Проведенные исследования актуализируют данные о климатических нормах, которые могут быть использованы при планировании и управлении различных природно-хозяйственных систем, включая создание новых объектов особо охраняемых природных территорий (ООПТ), адаптацию лесного хозяйства. Результаты работы могут быть применены для организации системы более эффективной охраны природы, в частности реликтовых для Крыма субсредиземноморских ландшафтов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Наличие леса и характеристики его кроны оказывают значительное влияние на распределение вещества и энергии в ландшафте, особенно на тепловой баланс. Степень этого влияния определяется сезонным изменением рельефа крон, чем более развитая крона, тем сильнее ее влияние на распределение потоков тепла и энергии.

2. Сезонные изменения сложности распределения солнечной радиации, индекса NDVI, экспозиции и крутизны кронового рельефа приводят к изменению некоторых микроклиматических параметров, таких как температура воздуха, почвы, количества испарения, что отражается в

формировании стратегий развития или стабилизации основных типов ландшафтов. В лесах юго-восточного Крыма при смене сезонов за счет высоты солнца над горизонтом в летний период происходят процессы стабилизации.

3. На основании значения индекса Херста можно утверждать, что тренд изменения зеленой фитомассы сохранит свою направленность на увеличение, система будет оставаться стабильной, и будут сформированы предпосылки для стратегии развития в пределах рассматриваемых лесных ландшафтов.

4. Спрогнозированное геоэкологическое состояние рассматриваемых ключевых участков на основе сценариев изменения климата демонстрирует большую вероятность распространения средиземноморской растительности на юго-востоке Крыма при сохранении тенденции изменения климата.

Методология и методы исследования. Работа основана на фундаментальных исследованиях в области физической географии, климатологии, геоэкологии, ландшафтной экологии и ландшафтоведения. В работе были использованы следующие методы исследования: литературно-аналитический, полевые методы исследования, картографический, геоинформационный (программный комплекс продуктов ArcGIS, QGIS, Pix4D), аэрокосмические методы (получение космических снимков высокого разрешения из открытых источников (Landsat, Sentinel, MODIS) и их анализ), дистанционные методы (БПЛА съемка), математические а также статистические (программное обеспечение для статистической обработки полученных данных (Microsoft Excel)). Методологической основой исследования выступают представления о лесных ландшафтах [Алексеев, 1975; Арманд, 1975; Беручашвили, 1986, 1990; Бобра, 2007; Боков, 2020; Гаркуша, 2008; Зукерт, 1967; Боков, 2011] и их функционировании и динамике [Акимова, 1975; Антюфеев, 1988; Барашкова, 1961; Берлянд, 1948; Битюков, 2012; Будыко, 1956; Ведь, 1978; Выгодская, 1967; Горбунов, 2022], а также применении геоинформационных технологий. В основу работы легли результаты собственных исследований автора за период с 2020 по 2025 гг.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности: Работа соответствует паспорту специальности 1.6.21 «Геоэкология» (пункты 5, 7, 11, 14, 16).

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Работа выполнена автором в течении 2020–2025 гг. Основные результаты диссертационной работы явились составной частью тем НИР № 121040100327-3 «Изучение пространственно-временной организации водных и сухопутных экосистем с целью развития системы оперативного мониторинга на основе данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий», НИР № 124030100030-0 «Изучение особенностей функционирования и динамики субтропических и тропических прибрежных экосистем в условиях изменения климата и антропогенной нагрузки с использованием методов дистанционных исследований, технологий облачной обработки информации и машинного

обучения для создания научных основ их рационального использования», Гранта РНФ №22-27-00579 «Функционирование низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов (на примере юго-восточного Крыма)», и Гранта Минобрнауки России в форме субсидий на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития «Динамика геоэкологического состояния бассейнов горных рек Северо-Восточного Кавказа, Азербайджана и Ирана в условиях изменения климата и растущей антропогенной нагрузки» № 075-15-2024-644. Апробация материалов исследования проведена на Всероссийской научной конференции, посвященной 30-летию Карадагского ландшафтно-экологическому стационару «Экспериментальное ландшафтоведение: теория, методология, практика» (г. Феодосия, пгт Курортное; Севастополь: ФИЦ ИнБЮМ, 25–29 сентября 2023 г.), Международной научно-практической конференции «Природно-ресурсный потенциал и экологическая реабилитация деградированных ландшафтов» (Грозный, 17–18 марта 2023 г.), VI Кавказском Международном экологическом форуме «Комплексное изучение экосистем горных территорий» (Грозный, 20–21 октября 2023 г.), Международной научно-практической конференции «Пятые ландшафтно-экологические чтения, посвященные Г. Е. Гришанкову» Природа и общество: интеграционные процессы (Севастополь, 12–16 сентября 2022), III Международной научно-практической конференции «Изучение водных и наземных экосистем: история и современность» (Севастополь, 2–7 сентября 2024 г.), II Международной научно-практической конференции «Изучение водных и наземных экосистем: история и современность» (Севастополь, 5–9 сентября 2022 г.).

Публикации. По теме работы опубликовано 18 работ, в том числе: 3 работы в изданиях МБД SCOPUS и Web of Science, 7 статей в журналах из перечня ВАК, 2 главы в монографиях, 1 монография.

Объем и структура работы. Общий объем основной части работы составляет 279 страниц машинописного текста. Работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы, состоящего из 416. Работа включает 108 рисунков и 18 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, описана степень разработанности темы, сформулированы цель, задачи, методология и методы исследования, охарактеризована научная новизна диссертационной работы, описана практическая и теоретическая значимость научного исследования, приведены сведения об апробации и степени достоверности результатов диссертационного исследования.

РАЗДЕЛ 1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ОСНОВАХ ФОРМИРОВАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СУБСРЕДИЗЕМНОМОРСКИХ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Тема изменения климата и глобального потепления широко обсуждается обществом и научным сообществом как одно из самых актуальных направлений научно-технической деятельности, а также экономики и политики. Характер мышления и подходы к адаптации к климатическим изменениям сместились от реактивного реагирования на катастрофы к предупреждению и управлению рисками.

В настоящее время этой проблемой занимаются ведущие институты во многих странах, а также практически все международные организации осуществляют программы сотрудничества по решению проблемы глобального потепления. Теоретическая сторона вопроса охватывает все масштабные уровни от глобального до локального. При этом нет общепринятой методологии прогнозирования изменений.

Исследования в области формирования и функционирования лесных горных ландшафтов представляют собой активно развивающуюся область науки. В рамках Крымского полуострова, который обладает богатыми природными условиями и уникальным биоразнообразием, изучение лесных горных ландшафтов приобретает особую важность. Однако большинство отечественных исследований в этой области склонны фокусироваться на региональном уровне, уделяя меньше внимания топологическим аспектам. Такой подход, несмотря на свою значимость, ограничивает возможность понимания локальных особенностей структуры и функционирования лесных горных ландшафтов. Поэтому имеется необходимость в проведении более детальных исследований лесных горных ландшафтов на обоих уровнях – и региональном, и топологическом.

Анализ формирования лесных ландшафтов Юго-Восточного Крыма выявил значительное влияние топографических особенностей, характерных для субсредиземноморских территорий. Таким образом, изучение формирования и функционирования лесных ландшафтов является ключевым для понимания их устойчивости в условиях климатических изменений. Совокупность факторов и условий внешней среды, включающая сложный рельеф, мозаичность растительного покрова и воздействие животного мира, обуславливает высокую пространственную дифференциацию лесных ландшафтов Юго-Восточного Крыма, формируя их уникальный облик и функциональные особенности. Это подчеркивает необходимость учета локальных факторов при анализе формирования и функционирования субсредиземноморских лесных ландшафтов.

РАЗДЕЛ 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В разделе предложены теоретико-методологические подходы к изучению функционирования лесных ландшафтов и их реакции на изменение климата. Описаны материалы и методики расчетов показателей, отражающих особенности функционирования и динамики лесных экосистем и направление ландшафтных стратегий в условиях изменения климата (рисунок 1).



Рис. 1 – Схема проведения исследования

Одним из этапов данного исследования являлось на основе полевых экспедиционных, полустационарных и стационарных методов исследования описать радиационный, тепловой и водный балансы различных типов лесных ландшафтов в условиях субсредиземноморского низкогорья, демонстрируя роль растительного покрова в перераспределении вещества и энергии в ландшафте.

Методика изучения ландшафтных стратегий в условиях климатических изменений основывается на том, что изменение растительного покрова

является одним из ведущих показателей реакции ландшафта на изменение факторов и условий внешней среды. Изменение растительности оценивается различными способами – с применением компьютерного моделирования, с использованием методов дистанционного зондирования, через изменение соотношения типов наземного покрова, изменение характеристик вегетационных индексов. В последние годы для оценки изменения растительности все чаще применяется анализ динамики значений вегетационного индекса NDVI. При построении вегетационных моделей расчеты проводятся на основе сценариев изменения климата Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) до 2100 года.

Имея на основе проведенных мониторинговых измерений данные о микроклиматических условиях произрастания рассматриваемых лесных сообществ, с помощью динамической модели растительности LPJ-GUESS становится возможным спрогнозировать варианты их развития в зависимости от показателей изменения климата.

РАЗДЕЛ 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИАЦИОННОГО, ТЕПЛОВОГО И ВОДНОГО БАЛАНСОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ НИЗКОГОРНЫХ СУБСРЕДИЗЕМНОМОРСКИХ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ

На основе проведенных измерений основных климатических параметров на выбранных ключевых участках были рассчитаны значения радиационного, теплового и водного балансов.

Расчет радиационного баланса на открытом участке позволяет определить его внутригодовую динамику без учета растительного покрова. В лесном сообществе происходит перераспределение, поступающей энергии в ландшафт, и формируется баланс на поверхности кроны и под пологом. Динамика состояния растительного покрова и характеристики его кроны создают сложную мозаичную организацию и протекание процессов распределения потоков энергии в лесных ландшафтах, что характеризуется наличием на одной территории участков как с положительным, так и с отрицательным радиационным балансом.

В пушистодубовых и можжевельниковых лесах прослеживается единая закономерность изменения значений поступающей солнечной радиации в течение суток и в распределении по экспозициям склонов кронового рельефа. Различие значений поступающей солнечной радиации на участки с одинаковыми условиями может объясняться нахождением некоторых из них в затененной части.

В обоих случаях, несмотря на кардинально отличающуюся форму и структуру лесного сообщества, отмечается отрицательный радиационный баланс подкروнового пространства в рамках средних значений при наличии существенных просветов в кроне деревьев с положительным балансом.

Данное распределение демонстрирует сложную организацию и протекание процессов распределения потоков вещества и энергии в пределах можжевельного и пушистодубового лесов.

Тепловой баланс описывается как распределение радиационного баланса на затраты тепла на испарение, вертикальный турбулентный теплообмен и поток тепла в почве. При анализе результатов отмечается формирования подкroновым пространством собственного температурного режима, отличного от открытого участка. Так в зимний период происходит сохранение тепла почвой и воздухом, а в летний наоборот, измерения на открытом участке превышали значения под пологом.

На обоих рассматриваемых участках температура воздуха зимой на открытом участке меньше, чем под пологом леса, затем выравнивается в марте и становится на открытом участке больше, чем под пологом. Различия проявляются в разнице температур – зимой в пушистодубовом лесу она незначительна и колеблется около нуля, а весной и летом достигает до 2–3 °С. В то же время в можжевельном лесу летнее превышение температуры на открытом участке над лесом достигает до 6 °С.

Данное распределение элементов теплового баланса демонстрирует сложную организацию и протекание процессов распределения потоков вещества и энергии в пределах можжевельного и пушистодубового леса.

В водном балансе особо выделяются горизонтальные осадки. Происходят процессы вытеснения степных сообществ верхних частей склонов лесными. Рост ливневых осадков в летний период приводит к быстрому смыву воды с верхних частей склонов, для которых характерны петрофитно-степные сообщества и росту влажности почвы в нижних частях склонов, что формирует условия, благодаря которым лесные сообщества поднимаются вверх по склону. Что отчетливо видно при расчете вегетационного индекса NDVI.

РАЗДЕЛ 4. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЮГО-ВОСТОЧНОГО КРЫМА В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

На основе описанной в разделе 2 методики была проведена геоэкологическая оценка и прогноз изменения структуры растительных сообществ юго-восточного Крыма в условиях изменения климата.

На территории Карадагского заповедника на ключевых участках пушистодубового и можжевельного лесов в ходе проведения исследований были получены данные по крутизне и экспозиции кронового рельефа в весенний и летний периоды, распределение по нему поступающей солнечной радиации в течение дня и значения вегетационного индекса NDVI. На основе этих данных была рассчитана энтропия, как показатель формирования стратегий развития или стабилизации ландшафтов при изменении характера кронового рельефа и количества солнечной радиации во времени.

Значения крутизны склонов кронового рельефа на обоих участках леса имеют схожий характер изменения. В весенний период отмечается значительное преобладание больших значений уклонов поверхности, а в летний период распределение значений происходит более равномерно. Это связано с отсутствием листвы в зимне-весенний период и фиксацией стволов и веток деревьев, что распознается как очень крутые склоны. А летом за счет сформированной кроны фиксируемый рельеф сглаживается. Более ярко данная ситуация проявляется в пушистодубовом лесу, как полностью лиственном, а в можжевелевом вечнозеленом лесу в меньшей степени за счет отдельных лиственных деревьев и кустарников.

При рассмотрении значений факторной энтропии по распределению NDVI выделяется разница между значениями пушистодубового и можжевелевого лесов. Относительно высокие показатели в можжевелевом лесу демонстрируют равномерное распределение количества значений по выделенным контурам, в то время как в пушистодубовом лесу большая часть располагается в среднем.

Таким образом показатель энтропии демонстрирует сезонные изменения сложности распределения солнечной радиации, индекса NDVI, экспозиции и крутизны кронового рельефа, изменения которых влечет за собой изменение некоторых климатических параметров, таких как температура воздуха, почвы, количества испарения. Это, в свою очередь, приводит к трансформации всей системы взаимодействий внутри ландшафта. На основании анализа видно, что в формировании факторной энтропии ландшафта большую роль играет сезонная динамика его собственных и окружающих компонентов, что отражается в формировании стратегий развития или стабилизации основных типов ландшафтов.

В пределах территории Юго-Восточного Крыма наблюдается значительная пространственно-временная дифференциация не только самих значений NDVI, но и направленности трендов их изменения. На рисунке 2(а) показан анализ трендов изменения NDVI за весь период с 2001 по 2022 гг.

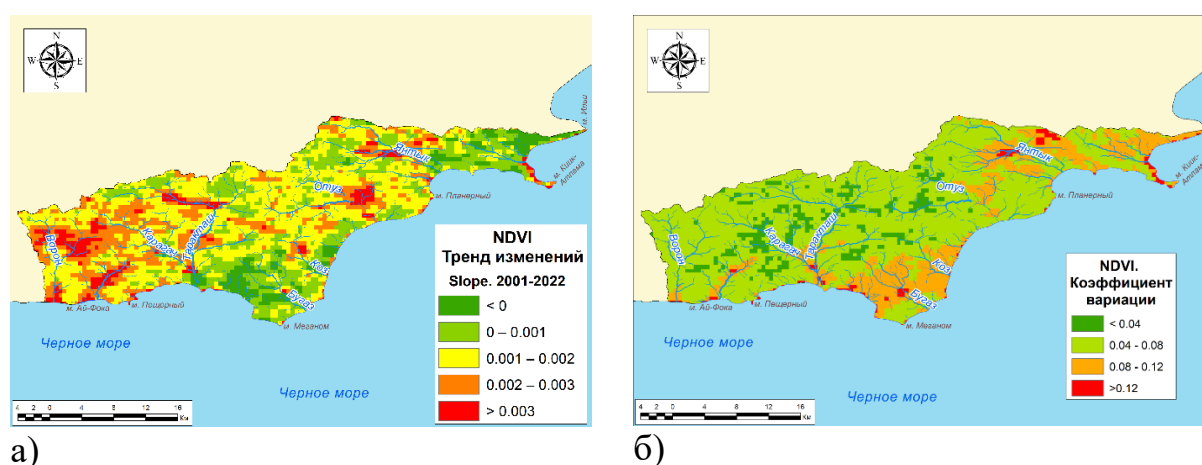


Рис. 2 – а) Тренд значений NDVI 2001–2022 гг., б) Коэффициент вариации NDVI в Юго-Восточном Крыму

В пределах ландшафтов можжевеловых и дубовых лесов характерны наибольшие значения положительных трендов изменчивости, в результате чего в целом в пределах этих ландшафтов формируются стратегии развития. Наименьшей изменчивости подвержены ландшафты антропогенно созданных растительных сообществ (садов и виноградников), так как на всем протяжении своего существования они поддерживаются искусственно в результате деятельности человека.

Оценка коэффициента вариации значений NDVI позволила выделить наиболее стабильные и сильно изменяемые значения NDVI в Юго-Восточном Крыму. Как видно из рисунка 2(б) большая часть исследуемого региона характеризуется стабильным распределением значений NDVI. Незначительные и сильные изменения характерны для южной и юго-восточной частей исследуемого региона.

Исследование изменения растительности является чрезвычайно важной задачей, так как растительный покров реагирует одним из первых на многие реакции окружающей внешней среды. Особенно это важно исследовать в регионах, в которых произрастают леса, как один из ценнейших ресурсов для развития различных сфер деятельности. Для Юго-Восточного Крыма в целом и в пределах основных растительных сообществ впервые проанализирована динамика NDVI и рассчитаны значения индекса Херста.

Наименьшие значения индекса Херста (Рис. 3) преимущественно наблюдаются в северных и северо-западных секторах области исследования, в то время как наивысшие значения систематически фиксируются в прибрежных, южных и юго-восточных регионах. Высокие значения индекса Херста особенно выделяются вблизи городских населенных пунктов, таких как Щебетовка, Курортное, Судак, Солнечная Долина и другие.

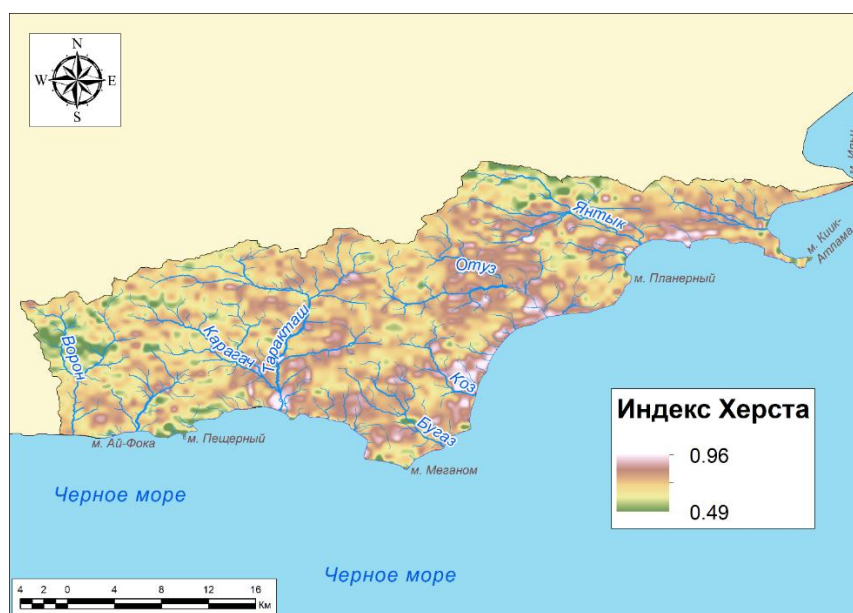


Рис. 3 – Значение индекса Херста в Юго-Восточном Крыму

Для оценки воздействия климатических факторов на изменение NDVI проанализированы динамика изменения среднегодовых значений температуры воздуха, количества выпадающих осадков и солнечной радиации в пределах Юго-Восточного Крыма, и рассчитаны коэффициенты корреляции между значениями этих факторов и значениями NDVI.

Согласно сформулированным сценариям изменения выбросов углерода и повышения температуры воздуха до конца XXI века с помощью модели были спрогнозированы показатели динамики растительности и их характеристик на локальном уровне.

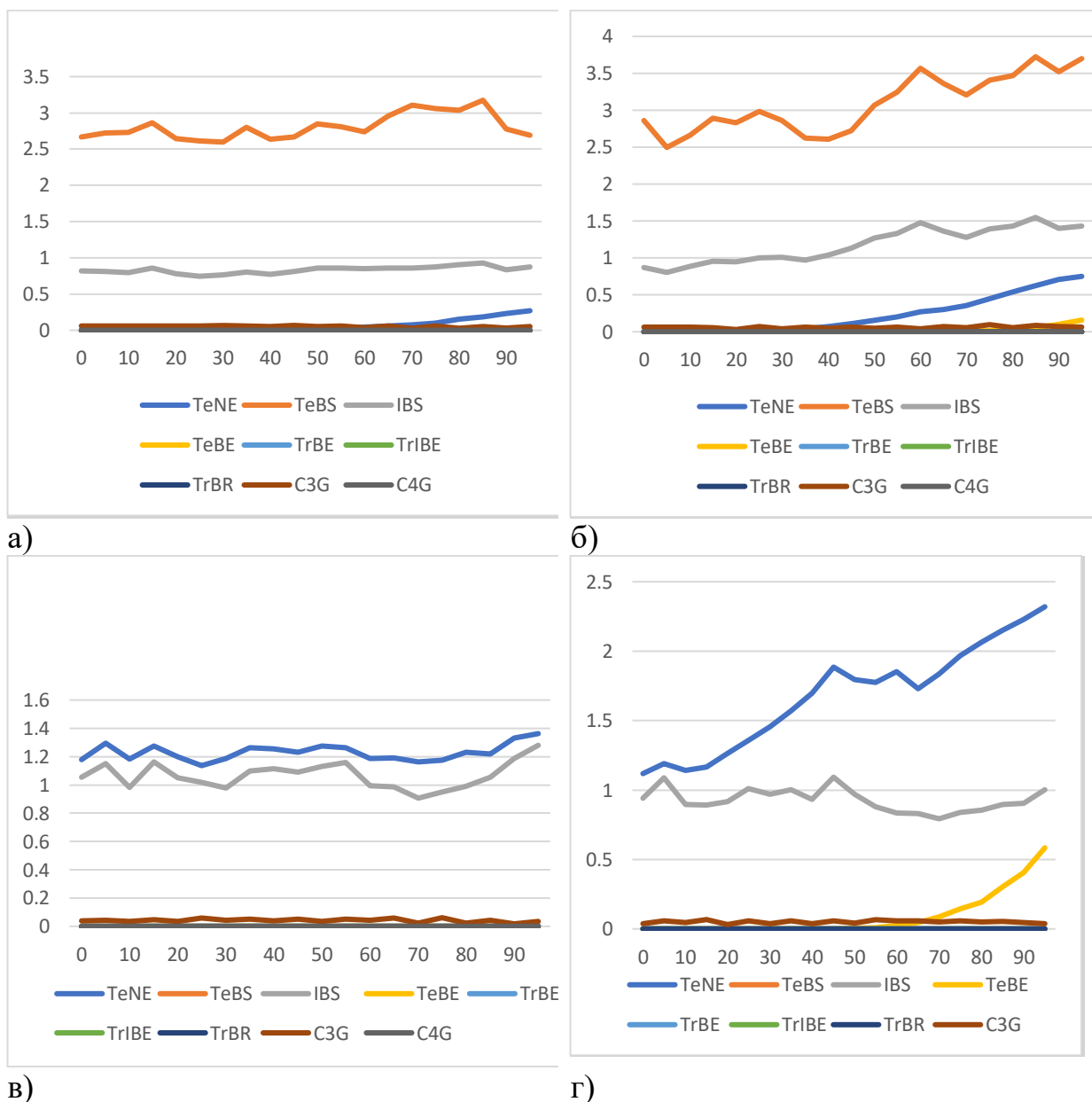


Рис. 4 – Количество прогнозируемой биомассы(C) категорий растений кг/м²: а) по первому сценарию в пушистодубовом лесу, б) по пятому сценарию в пушистодубовом лесу, в) по первому сценарию в можжевеловом лесу, г) по пятому сценарию в можжевеловом лесу.

Повышение средних температур позволит в перспективе распространиться можжевельниковому сообществу и возможным аналогам (TeNE). А скорость данного процесса напрямую зависит от степени потепления. Таким же образом на рассматриваемых ключевых участках при максимально прогнозируемом повышении температуры могут появиться представители группы тропических деревьев (TeBE), в нашем случае представленных земляничником мелкоплодным к концу прогнозируемого периода.

Помимо биомассы были рассчитаны также и другие показатели, описывающие перемещение вещества в лесном сообществе, такие как перемещение углерода растительностью, почвой, пожарами и во время естественного экосистемного обмена (NEE), Перемещение N азота, Чистая первичная продукция (кг/м^2 в год).

Анализируя результаты по двум выбранным ключевым участкам, можно проследить влияние орографических особенностей местности на локальном уровне, за счет которых на очень близко расположенных участках формируются различные климатические особенности, в можжевельниковом лесу изначально средние температуры выше, чем в пушистодубовом. Данные различия, при общем характере изменений, определяют сроки, через которые в том или ином сценарии начнутся процессы изменения, что особенно заметно по появлению в ландшафте группы деревьев TeBE (представленных в Крыму земляничником мелкоплодным). Помимо теплового режима орография в целом создает сильно отличающиеся условия для произрастания растений. Ровный пологий склон первого ключевого участка подходит для формирования пушистодубового сообщества с сопутствующей растительностью, в то время как крутые осыпные склоны больше подходят для растений, переносящих засуху и способных закрепляться в скалах без мощного почвенного покрова. При описании данного сообщества важно отметить, что прогнозы модели основываются исключительно на климатических условиях и не способны учесть локальные орографические особенности местности. Для рассматриваемого можжевельникового сообщества необходимо учитывать расположение на практически 45° склоне южной экспозиции с небольшой мощностью почвенного покрова, что не способствует задержанию поступающей влаги в ландшафт и формирует условия для более ксерофитных пород деревьев и кустарников. Таким образом необходимо учитывать невозможность произрастания группы TeBS на данном участке. Однако наибольшую роль в функционировании рассматриваемой территории в будущем играет микроклимат, его изменение под влиянием антропогенной деятельности. Интенсивность которой определит, скорость изменения структуры ландшафтов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

1. В результате обзора отечественных и зарубежных исследований в области формирования и функционирования лесных горных ландшафтов на топологическом уровне установлено, что исследуемым вопросам как в мировой, так и в отечественной литературе уделяется крайне мало внимания. Наблюдается разрозненность методик исследования, разорванность и несвязность ареалов исследований, различные подходы к трактовкам изучаемых явлений. Исследования часто приводятся для региональных операционно-территориальных единиц, по пути укрупнения и усреднения, при этом теряется связь с локальным уровнем исследования, и попытками установить основные закономерности формирования и функционирования горных ландшафтов на топологическом уровне.

2. Благодаря разработанному научному подходу использования БПЛА для изучения функционирования низкогорных ландшафтов установлено, что поступление солнечной радиации на поверхность крон в ясную безветренную погоду определяется крутизной кронового рельефа и ориентацией склона по отношению к солнцу в конкретный период времени. Максимальные значения характерны для пологих склонов в 12:00. Пространственно-временная дифференциация значений суммарной солнечной радиации, проникающей в подпологовое пространство в пределах светового дня, определяется сомкнутостью и положением крон относительно направленных на поверхность солнечных лучей. Так же на неоднородность в пропускании суммарной солнечной радиации пологом большое влияние оказывают плотность листового перекрытия и «окна», образующиеся между ветвями деревьев. Отмечается большая амплитуда значений степени пропускания от 8 до 100 % в пределах пушистодубовых и можжевельниковых лесов.

3. При рассмотрении составляющих радиационного баланса отмечается, что средние значения элементов коротковолновой части показывают характер изменения с максимальными значениями радиации в полдень. Разница между минимальными и максимальными значениями доказывает сложность кронового рельефа изучаемых типов лесов и распределения в них потоков поступающей радиации. Длинноволновое излучение, с ростом значений, указывает на постепенный прогрев почвенного покрова на протяжении всего дня и отдачу тепла в приземный слой воздуха, что при сравнении с коротковолновой частью формирует отрицательный радиационный баланс в затененных участках подпологового пространства и положительный баланс на открытых. Данное распределение значений демонстрирует сложную организацию и протекание процессов распределения потоков вещества и энергии в пушистодубовом и можжевельниковом лесах.

4. Полученные данные об элементах теплового баланса демонстрируют, что наибольшая часть радиационного баланса расходуется на турбулентный поток тепла, и меньшая часть расходуется на испарение и поток тепла в почве. Также большую роль в распределении поступающей солнечной радиации играют кроны деревьев. Наиболее ярко это наблюдается у лиственных пород деревьев, для которых характерно полное отсутствие листвы в зимний период и максимальное развитие кроны в летний, таким образом под влиянием характера растительности формируется временная (сезонная) дифференциация значений суммарной солнечной радиации, проникающей в подпологовое пространство. Наиболее сильно данное явление фиксируется в пушистодубовом лесу, а в можжевельниковом проявляется за счет единичных лиственных деревьев.

5. При анализе показателей характерных для открытой местности и подпологового пространства выявлено, что среднесуточная температура воздуха в лесу за рассматриваемый период всегда выше температуры на открытом участке благодаря наличию кроны, влияние которой увеличивается по мере ее развития. Для значений температуры почвы характерно сохранение тепла пологом леса в зимний период, в марте значения выравниваются и с началом вегетационного периода отмечается снижение температуры в лесном участке. Характер изменения значений турбулентного потока тепла и затрат тепла на испарение соответствует радиационному балансу, происходит постепенное увеличение значений с зимнего по летний период. Поток тепла в почву в свою очередь характеризуется попеременным возрастанием и уменьшением в рамках определенного диапазона, с уменьшением амплитуды в летний период.

6. Установлено, что лесная растительность всегда оказывает влияние на тепловой баланс ландшафтов, но степень ее влияния определяется сезонной сменой листвы деревьями, чем более развитая крона, тем сильнее ее влияние на распределение потоков тепла и энергии.

7. Проанализированные особенности элементов водного баланса формируют условия, способствующие вытеснению степных сообществ лесными видами, что подтверждается результатами полевых и дистанционных исследований.

8. Показатель энтропии демонстрирует сезонные изменения сложности распределения солнечной радиации, индекса NDVI, экспозиции и крутизны кронового рельефа, изменения которых влечет за собой изменение некоторых климатических параметров, таких как температура воздуха, почвы, количества испарения. Это, в свою очередь, приводит к трансформации всей системы взаимодействий внутри ландшафта. На основании анализа видно, что в формировании факторной энтропии ландшафта большую роль играет сезонная динамика его собственных и окружающих компонентов, что отражается в формировании стратегий развития или стабилизации основных типов ландшафтов. Таким образом полученные значения указывают на то, что

при смене сезонов за счет высоты солнца над горизонтом в летний период происходят процессы стабилизации.

9. На основе расчета индекса NDVI и анализа его пространственно-временной изменчивости с 2001 по 2022 гг. установлено, что в пределах Юго-Восточного Крыма наиболее стабильными по значениям зеленой фитомассы являются ландшафты лесов, по сравнению с ландшафтами степей и антропогенно созданных сельскохозяйственных угодий и населенных пунктов. В пределах Юго-Восточного Крыма с 2001 по 2022 гг. наблюдается тенденция к росту значений вегетационного индекса и имеется положительный тренд на увеличение значений вегетационного индекса NDVI. Наибольшие значения положительных трендов изменчивости выявлены в ландшафтах, где преобладают мозаичные комплексы можжевельниковых и дубовых лесов. Эти результаты указывают на формирование стратегий развития в общем контексте данных ландшафтов.

10. По результатам анализа значений индекса Херста, рассчитанного на основании вегетационного индекса NDVI, выявлено, что тренд изменения зеленой фитомассы сохранит свою направленность на увеличение, и в целом система будет оставаться стабильной, и будут сформированы предпосылки для стратегии развития в пределах рассматриваемых можжевельниковых и дубовых лесных ландшафтов. Наивысшие значения преобладают в прибрежных, южных и юго-восточных частях Юго-Восточного Крыма, особенно вблизи населенных пунктов, таких как Щебетовка, Курортное, Судак, Солнечная Долина и другие.

11. На основе сценариев изменения климата были спрогнозированы основные показатели состояния и функционирования пушистодубового и можжевельникового лесов на протяжении ближайших 100 лет. Получены общие данные по продуктивности и объему занимаемой биомассы каждой группы деревьев и травянистой растительности. Выявлены предпосылки к смещению границ субтропической зоны (средиземноморского типа климата) на север с развитием соответствующей растительности.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Сафонова М.С., Горбунов Р.В., Табунщик В.А., Горбунова Т.Ю.** Прогноз динамики структуры растительного сообщества в зависимости от сценариев изменения климата // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2024. – Т. 9, № 4(38). – С. 73-81.

2. **Сафонова М.С., Табунщик В.А., Горбунов Р.В., Горбунова Т.Ю.** Радиационный баланс можжевельниковых лесов Карадагского природного заповедника // Геология, география и глобальная энергия. – 2024. – №4 (95). – С. 29-48.

3. **Safonova M. S.**, Tabunshchik V. A., Gorbunov R. V., Gorbunova T. Yu. Radiation balance of low-mountain sub-Mediterranean forest landscapes (on the example of the Karadag Nature Reserve) // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2024. – Т. 20, № 3. – С. 233-258.

4. Горбунов Р. В., Горбунова Т. Ю., Табунщик В. А., Дрыгваль А. В., **Сафонова М. С.** Динамика атмосферных осадков в ландшафтах Горного Крыма // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2021. – Т. 6, № 4 (26). – С. 28-38.

5. Горбунов Р. В., Табунщик В. А., Горбунова Т. Ю., **Сафонова М. С.** Динамика температуры воздуха в основных типах региональных экосистем горного Крыма // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2021. – Т. 29, № 1. – С. 39-54.

Публикации в журналах, индексируемых в реферативной базе Web of Science / SCOPUS:

6. **Safonova M.**, Tabunshchik V., Gorbunov R., Gorbunova T. Heat Budget of Sub-Mediterranean Downy Oak Landscapes of Southeastern Crimea // Forests. – 2023. – Vol. 14, iss. 10. – Art. no. 1927 (21 p.).

7. Tabunshchik V., Gorbunov R., Gorbunova T., **Safonova M.** Vegetation Dynamics of Sub-Mediterranean Low-Mountain Landscapes under Climate Change (on the Example of Southeastern Crimea) // Forests. – 2023. – Vol. 14, iss. 10. – Art. no. 1969 (23 p.).

8. Gorbunov R., Tabunshchik V., Gorbunova T., **Safonova M.** Water Balance Components of Sub-Mediterranean Downy Oak Landscapes of Southeastern Crimea // Forests. – 2022. – Vol. 13, iss. 9. – Art. no. 1370 (14 p.).

Монография:

9. Горбунов Р. В., **Сафонова М. С.**, Табунщик В. А., Горбунова Т. Ю. Функционирование низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов (на примере Юго-Восточного Крыма). Симферополь : ИТ АРИАЛ, – 2023. – 148 с.

Публикации в других изданиях:

10. Кононова Н. К., Горбунов Р. В., Горбунова Т. Ю., Лапченко В. А., **Сафонова М. С.** Связь экстремальных осадков в Крыму с макроциркуляционными процессами // Сложные системы. – 2020. – № 3 (36). – С. 4-29.

11. Кононова Н. К., Горбунов Р. В., Горбунова Т. Ю., **Сафонова М. С.** Связь экстремальных осадков на восточном берегу Черного моря с макроциркуляционными процессами // Сложные системы. – 2020. – № 3 (36). – С. 30-53.

12. Kononova N.K., Gorbunov R.V., Gorbunova T.Yu., **Safonova M.S.** Relationship of extreme precipitations in the Crimea with macrocirculation processes // The Complex Systems. – 2020. – № 3 (9). – P 3-27.

13. Kononova N.K., Gorbunov R.V., Gorbunova T.Yu., **Safonova M.S.** Relationship of extreme precipitations on the eastern Black Sea coast with macrocirculation processes // The Complex Systems. – 2020. – № 3 (9). – P 28-51.