Горбунов Роман Вячеславович

Доктор географических наук, директор ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН». Геоэколог, ландшафтовед, специалист в области изучения структуры, функционирования и динамики ландшафтов, реакции ландшафтов на изменения климата. Действительный член Русского географического общества, Общества почвоведов имени В.В. Докучаева, Международной ассоциации ландшафтной экологии. Заслуженный деятель науки и техники Республики Крым. Автор более 200 научных публикаций.

Сафонова Мария Сергеевна

Младший научный сотрудник научно-исследовательского центра геоматики ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН». Ландшафтовед, специалист в области изучения сухопутных ландшафтов в условиях изменения климата на основе данных дистанционного зондирования Земли. Действительный член Русского географического общества, Общества почвоведов имени В.В.Докучаева. Автор более 20 научных публикаций.

Табунщик Владимир Александрович

Научный сотрудник научно-исследовательского центра геоматики ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН». Ландшафтовед, специалист в области геоинформатики. Действительный член Русского географического общества, Общества почвоведов имени В.В.Докучаева, секретарь Крымского отделения Общества почвоведов имени В.В. Докучаева, эксперт Молодежного клуба Русского географического общества «Крым». Автор более 100 научных публикаций.

Горбунова Татьяна Юрьевна

Кандидат географических наук,научный сотрудник научно-исследовательского центра геоматики ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН». Геоэколог, ландшафтовед, специалист в области изучения структуры и функционирования субтропических и тропических лесных ландшафтов. Действительный член Русского географического общества, Общества почвоведов имени В.В.Докучаева, Международной ассоциации ландшафтной экологии. Лауреат научных премий Республики Крым. Стипендиат Президента Российской Федерации. Награждена нагрудным знаком «Молодой ученый». Автор более 100 научных публикаций.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ НИЗКОГОРНЫХ СУБСРЕДИЗЕМНОМОРСКИХ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ (НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОГО КРЫМА)

Р.В. ГОРБУНОВ, М.С. САФОНОВА, В.А. ТАБУНЩИК, Т.Ю. ГОРБУНОВА

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ НИЗКОГОРНЫХ СУБСРЕДИЗЕМНОМОРСКИХ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ

(НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОГО КРЫМА)

Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН
Симферополь
2023

A. O. KOVALEVSKY INSTITUTE OF BIOLOGY
OF THE SOUTHERN SEAS OF RAS

R.V. Gorbunov, M. S.Safonova, V. A. Tabunshchik, T.Yu. Gorbunova

FUNCTIONING OF LOW-MOUNTAIN SUB-MEDITERRANEAN FOREST LANDSCAPES (ON THE EXAMPLE OF THE SOUTHEASTERN CRIMEA)

Simferopol – 2023

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ ИМЕНИ А. О. КОВАЛЕВСКОГО РАН»

Р. В. Горбунов, М. С. Сафонова, В. А. Табунщик, Т. Ю. Горбунова

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ НИЗКОГОРНЫХ СУБСРЕДИЗЕМНОМОРСКИХ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ (НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОГО КРЫМА)

Симферополь – 2023

УДК[911.52:551.583](292.471)”19/20”
ББК 26.821.71
Г67

Рецензенты
Вахрушев Борис Александрович, доктор географических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского»

Панкеева Татьяна Викторовна, кандидат географических наук,
ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»

Горбунов Р. В., Сафонова М. С, Табунщик В. А., Горбунова Т. Ю.
Г67 Функционирование низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов (на примере Юго-Восточного Крыма). Монография. – Симферополь: ИТ АРИАЛ, 2023. – 148 с.
ISBN 978-5-907742-99-4

В книге представлены результаты стационарных и полустационарных исследований функционирования низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов Юго-Восточного Крыма на топологическом уровне. Описаны факторы формирования и условия функционирования ландшафтов Юго-Восточного Крыма, которые обусловливают их пространственное распространение. Выполнены расчёты элементов радиационного, теплового и водного балансов в различных типах низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов. Описаны внутригодовые (сезонные) особенности функционирования ландшафтов. Рассчитана их внутренняя факторная энтропия, а также выявлены стратегии развития ландшафтов в условиях региональных проявлений изменения климата.

Книга рассчитана на географов, экологов, специалистов в области функционирования и динамики ландшафтов, лесной экологии и лесной микроклиматологии.

УДК[911.52:551.583](292.471)”19/20”
ББК 26.821.71

Gorbunov R.V., Safonova M. S., Tabunshchik V. A., Gorbunova T.Yu.
Functioning of Low-Mountain Sub-Mediterranean Forest Landscapes (on the Example of the Southeastern Crimea). Monograph. – Simferopol: IT ARIAL, 2023. – 148 p.
ISBN 978-5-907742-99-4

The book presents the results of stationary and semi-stationary studies on the functioning of low-mountain sub-Mediterranean forest landscapes of Southeastern Crimea at the topological level. The factors influencing the formation and conditions of functioning of the landscapes, which determine their spatial distribution, are described. Calculations of the radiation, heat and water balance elements are performed in different types of low-mountain sub-Mediterranean forest landscapes. Within-year (seasonal) features of landscape functioning are described. Their internal factor entropy is calculated, as well as strategies for landscape development are identified under conditions of regional manifestations of climate change.

The book is intended for geographers, ecologists, specialists in the field of landscape functioning and dynamics, forest ecology, and forest microclimatology.

Рекомендовано к печати ученым советом
ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»
(протокол № 14 от 27.11.2023 г.)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00579.

© Горбунов Р. В., 2023
© Сафонова М. С., 2023
© Табунщик В. А. 2023
© Горбунова Т. Ю., 2023
© ФИЦ ИнБЮМ, 2023
© ООО ИТ АРИАЛ, издание, 2023

ISBN 978-5-907742-99-4

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 7

Глава 1. Обзор отечественных и зарубежных исследований в области формирования и функционирования лесных горных ландшафтов на топологическом уровне 9

Глава 2. Факторы формирования и условия функционирования низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов Юго-Восточного Крыма 20

2.1. Географическое положение 20

2.2. Геологическое строение и рельеф 21

2.3. Климат 25

2.4. Водные объекты 27

2.5. Почвы 28

2.6. Растительный мир 29

Глава 3. Материалы и методы исследования 31

3.1. Стационарные исследовательские площадки в различных типах лесных ландшафтов Юго-Восточного Крыма 31

3.1.1. Исследовательская площадка на восточном склоне хребта Беш-Таш 31

3.1.2. Исследовательская площадка на южном склоне хребта Карагач 34

3.1.3. Приборная база и ее установка 36

3.2. Подход к изучению низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов с использованием беспилотных летательных аппаратов 38

3.3. Методика расчета водного, радиационного и теплового балансов 39

3.3.1. Методика изучения радиационного баланса 39

3.3.2. Методика изучения теплового баланса 43

3.3.3. Методика изучения водного баланса 45

3.4. Методика оценки факторной энтропии ландшафтов 47

3.5. Методика изучения ландшафтных стратегий в условиях климатических изменений 48

3.5.1. Данные 49

3.5.1.1. Растительность Юго-Восточного Крыма 49

3.5.1.2. Космические снимки 50

3.5.1.3. Температура, осадки и радиация 50

3.5.2. Методика исследования 51

3.5.2.1. Анализ изменения трендов NDVI 51

3.5.2.2. Коэффициент вариации 51

3.5.2.3. Индекс Херста 51

3.5.2.4. Корреляционный анализ 52

Глава 4. Результаты исследований элементов радиационного, теплового и водного балансов различных типов низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов 54

4.1. Радиационный баланс 54

4.1.1. Радиационный баланс в пределах открытого участка 54

4.1.2. Радиационный баланс пушистодубового леса 55

4.1.3. Радиационный баланс можжевелового леса 63

4.1.4. Сравнительный анализ радиационного баланса пушистодубового и можжевелового лесов 70

4.2. Тепловой баланс 71
4.2.1. Тепловой баланс открытого участка в зоне пушистодубового леса 71
4.2.1.1. Радиационный баланс 71
4.2.1.2. Затраты тепла на испарение 72
4.2.1.3. Турбулентный поток тепла 73
4.2.1.4. Поток тепла в почве 74
4.2.2. Тепловой баланс пушистодубового леса 74
4.2.2.1. Радиационный баланс 74
4.2.2.2. Затраты тепла на испарение 77
4.2.2.3. Турбулентный поток тепла 78
4.2.2.4. Поток тепла в почве 78
4.2.2.5. Связь температуры воздуха с основными элементами теплового баланса 79
4.2.3. Тепловой баланс открытого участка в пределах можжевелового леса 81
4.2.3.1. Радиационный баланс 81
4.2.3.2. Затраты тепла на испарение 84
4.2.3.3. Турбулентный поток тепла 85
4.2.3.4. Поток тепла в почве 85
4.2.4. Тепловой баланс можжевелового леса 86
4.2.4.1. Радиационный баланс 86
4.2.4.2. Затраты тепла на испарение 90
4.2.4.3. Турбулентный поток тепла 90
4.2.4.4. Поток тепла в почве 90
4.2.4.5. Связь температуры воздуха с основными элементами теплового баланса 91
4.2.5. Сравнительный анализ теплового баланса пушистодубового и можжевелового лесов 93
4.3. Водный баланс 94
Глава 5. Факторная энтропия низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов 105
Глава 6. Ландшафтные стратегии различных типов низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов в современных условиях климатических изменений 106
6.1. Динамика значений NDVI в Юго-Восточном Крыму 106
6.2. Тренд NDVI 111
6.3. Коэффициент вариации 113
6.4. Индекс Херста 115
6.5. Влияние климатических факторов на изменение NDVI в Юго-Восточном Крыму 116
6.6. Некоторые теоретические аспекты исследования ландшафтных стратегий 116

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 124

ВВЕДЕНИЕ

Функционирование ландшафтов определяется вещественно-энергетическим обменом между ландшафтом и окружающей его средой. Несмотря на достаточно продолжительную историю изучения этого вопроса в ландшафтоведении, 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.

А. Г. Исаченко (1991) справедливо отмечает, что для количественной оценки функционирования и выявления соотношения между внешним и внутренним вещественно-энергетическим обменом необходимы данные по балансам различных видов вещества и энергии, т. е. нужно знать величины их поступления в систему, внутреннего обмена, трансформации и аккумуляции в системе, потерь за счет выноса во внешнюю среду.

Изменение климата приводит к изменению структуры радиационного, теплового, водного и вещественного балансов ландшафтов, формируя таким образом трансформацию потоков вещества и энергии. Причем эти изменения формируют цепь событий, при развитии которой функциональные изменения приводят к структурным трансформациям в ландшафте. Структура лесов Крымского полуострова описана в литературе, однако исследованию функционирования лесных ландшафтов в Крыму уделено очень мало внимания, особенно на топологическом уровне.

Данная работа направлена на изучение процессов функционирования лесных ландшафтов в условиях субсредиземноморского низкогорья Юго-Восточного Крыма. Выбранная территория перспективна для изучения подобного типа ландшафтов, так как в ее пределах лесные сообщества формируются на границе своего ареала, по своей сути являясь геоэкотоном регионального масштаба, в достаточно экстремальных условиях среды, что определяет их высокую уязвимость к климатическим изменениям. 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.

Целью исследования является изучение процессов функционирования лесных ландшафтов в условиях субсредиземноморского низкогорья Юго-Восточного Крыма. Указанной цели работы соответствует ее структура. В первой главе монографии изложен опыт отечественных и зарубежных исследований в области формирования и функционирования лесных горных ландшафтов на топологическом уровне. Вторая глава посвящена описанию факторов формирования и условий функционирования низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов Юго-Восточного Крыма. В третьей главе описывается методика исследования и материалы, используемые в исследовании. В частности, разрабатываются критерии выбора исследовательских площадок в различных типах лесных ландшафтов Юго-Восточного Крыма, обосновывается научный подход к изучению низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов с использованием беспилотных летательных аппаратов, приводится методика расчета водного, радиационного и теплового балансов, а также методика оценки ландшафтных стратегий в условиях изменения климата. В четвертой главе изложены результаты исследований элементов радиационного, теплового и водного балансов различных типов низкогор-

ных субсредиземноморских лесных ландшафтов. В пятой главе показаны результаты анализа факторной энтропии низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов. Последняя, шестая, глава монографии демонстрирует возможности применения вегетационного индекса NDVI и расчета индекса Херста для выявления ландшафтных стратегий различных типов низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов в современных условиях климатических изменений.

Авторы с полной ответственностью осознают, что предложенные в данной монографии решения могут подвергаться существенным улучшениям. Именно поэтому мы с искренней благодарностью приветствуем любые критические замечания и конструктивные пожелания от читателей, экспертов и коллег. Мы искренне признательны за комментарии, которые могут внести ценный вклад в дальнейшее развитие и усовершенствование наших исследований. Мы приглашаем читателей активно участвовать в обсуждении представленных в монографии результатов исследования, а также предлагаем направлять ваши замечания и рекомендации на указанные электронные адреса авторов, чтобы способствовать обмену научной информацией, создать более точные, обоснованные и эффективные подходы к решению задач исследования функционирования ландшафтов.

С уважением, авторы

Горбунов Р. В. (gorbunov@ibss-ras.ru)
Сафонова М. С. (mari_malashina@bk.ru)
Табунщик В. А. (tabunshchyk@ya.ru)
Горбунова Т. Ю. (gorbunovatyu@gmail.com)

ГЛАВА 1

Обзор отечественных и зарубежных исследований в области формирования и функционирования лесных горных ландшафтов на топологическом уровне

На территории Большого Средиземноморья, заселенного и антропогенно преобразованного в течение многих тысячелетий, существуют и изучаются как природные нетронутые ландшафты, так и трансформированные. Приведем обзор наиболее актуальных направлений исследований на территории распространения субсредиземноморского и средиземноморского климата.

Горные и холмистые районы Средиземноморья активно используются в сельском хозяйстве, претерпевая трансформации в виде террасирования склонов. В результате террасирования изменялся геоморфологический облик склона, растительный покров, гидрологические условия существования. В последние десятилетия существует тенденция перехода к новой системе сельского хозяйства, характеризующаяся более современными технологиями. В результате прежние сельскохозяйственные районы утратили свое значение и были заброшены, произошла деградация земель. Начались такие неблагоприятные явления и процессы, как оползни, обвалы, интенсификация эрозионных процессов (Hernández et al., 2005; Geri et al., 2010; Moreno-de-las-Heras et al., 2019; Peña-Angulo et al., 2019).

Основная нагрузка переместилась из традиционной горной террасированной области в равнинную часть территории. Как следствие в горных районах наблюдаются процессы зарастания и восстановления лесного покрова.

Большое количество публикаций посвящено выявлению факторов, влияющих на вторичную сукцессию кустарников и лесов на заброшенных сельскохозяйственных полях (Hernández et al, 2005; Delgado-Artés et al, 2022).

F. Geri et al. (2010) изучали динамику ландшафтов в пределах Средиземноморского бассейна. Было проанализировано изменение землепользования с 1954 по 2000 гг. посредством сравнения и анализа исторических и современных карт землепользования, составленных на основе аэрофотосъёмки. В результате выявлено, что категория земель «леса» в 95% площади осталась неизменной, в то время как 13% «сельскохозяйственных земель» были преобразованы в леса и около 4% – в «полуестественные территории», которые, в свою очередь, сохранились в первоначальном виде только на 9%. 35% территории «полуестественных земель» за полвека стали использоваться как «сельскохозяйственные угодья», а 55% трансформировались в «леса». Результаты, достигнутые в этой статье, показали общую гомогенизацию изучаемого средиземноморского ландшафта с соответствующим процессом лесоразведения в ущерб полуестественным и сельскохозяйственным районам. Полученные закономерности изменений подтверждают выводы многих исследований, посвященных центральным и западным районам Средиземноморского бассейна. Однако исследования, посвященные южным и восточным районам Средиземноморского бассейна, выявили различные движущие силы изменений в землепользовании, в основном из-за разного социально-экономического положения (Geri et al., 2010).

Как результат исследования Geri et al. (2010) выделяют основные тенденции в динамике ландшафтов провинции Сиена (Тоскана, Италия), среди которых расширение лесных площадей в горных и холмистых районах из-за отказа от сельскохозяйственных угодий. Важно отметить, что при естественных сукцессиях наблюдается снижение биоразнообразия, гомогенизация ландшафтной мозаики и распространение монодоминантных сообществ как в лесной части, так и на равнинах.

Кроме того, активно изучаются факторы, влияющие на вторичную сукцессию, – природные (температуры воздуха, осадки, их изменение в исследуемый период, уклон поверхности, экспозиция и пр.) и антропогенные (тип полей, время заброшенности поля) (Peña-Angulo et al., 2019). Исследования этих авторов показали, что высота рельефа и климат являются ведущими в развитии и скорости вторичной сукцессии в горном районе Испании.

При анализе последствий трансформации землепользования и изучении зарастания лесными сообществами заброшенных сельскохозяйственных земель R. Delgado-Artés et al. (2022) говорят о внешней и внутренней эволюции лесов. Под внешней эволюцией подразумевается переход от лесных экосистем к нелесным и, наоборот, под внутренней – изменения внутри типа леса. Отмечается, что при внешней эволюции основным триггером может стать антропогенная деятельность, хотя природный фактор также играет важную роль. При внутренней же эволюции изменения природных условий являются ключевым фактором. Кроме этого, авторы выделяют прогрессивную, регрессивную и неустойчиво сбалансированную динамику ландшафтов. В работе (Cervera et al., 2019) показана динамика изменения лесов в Каталонии при сокращении использования сельскохозяйственных земель. Изучение динамики ландшафтов, изменения землепользования и развитие сукцессии проводятся в основном методами дистанционного зондирования – аэрофотосъемкой на низких высотах или с использованием космических снимков (Serra et al., 2008; Costa et al., 2011; Parcerisas et al., 2012; Senf et al., 2015; Requena-Mullor et al., 2018; Cervera et al., 2019; Sousa and Davis, 2020).

A. Costa et al. (2011) исследуют вопросы динамики ландшафтов дубовых лесов Юго-Западного Средиземноморья на примере ключевых участков в Португалии для выявления ключевых причин их деградации и фрагментации. Были использованы аэрофотоснимки, инструменты ГИС, различные показатели растительного покрова для количественной оценки и мониторинга изменения ландшафтной мозаики и скорости перехода между типами наземного покрова. Анализ проводился за 50-летний период. Результат исследования представлен в виде процентных соотношений изменения площади типа наземного покрова и сравнения по областям исследования. Также приведена социально-экономическая, демографическая оценка регионов. Ландшафты стали более фрагментированы, размеры контуров уменьшились. Три области исследования показали сходную тенденцию чистых потерь в вечнозеленых дубовых лесах, но совершенно разные процессы изменения ландшафта, то есть разные темпы изменения ландшафта, переходные процессы, фрагментация и модели вкрапления.

Для выявления динамики и функционирования лесных сукцессий в частности и лесных экосистем в целом проводятся исследования влажности почвенного покрова, температуры воздуха, осадков, поступления солнечной радиации неблагоприятных природных явлений, в том числе засух (Paoletti, 2005).

D. Sousa и W. Davis Frank (2020) разработали методику мониторинга и анализа состояния дубовых ландшафтов в условиях средиземноморского климата средствами дистанционного зондирования. В исследовании используются как космические снимки, так и материалы аэрофотосъемки. Авторы с помощью смешанных временных моделей TMMs проводят мониторинг состояния дубовых лесных ландшафтов на территории Сьерра-Невада.

Актуальными и востребованными направлениями исследования в Средиземноморском регионе являются моделирование трансформаций средиземноморского ландшафта (Molowny-Horas et al., 2015), выявление причин и следствий этих преобразований с помощью современных технологий, в том числе искусственного интеллекта (Papadimitriou, 2012).

Исследуется влияние землепользования и его трансформации на биоразнообразие территории, а также изменения, произошедшие в почвенном и растительном покрове (Sirami et al., 2010). В результате проведенных исследований выявлено, что около 80% анализируемых земель было подвержено изменению в использовании за 60-летний период. Изменения в землепользовании привели к переходу от ландшафтной мозаики с преобладанием открытых типов растительного покрова к ландшафтной мозаике с преобладанием лесистых типов растительного покрова. Аналогичные тенденции были зафиксированы в Испании (Lloret et al., 2002; Romero-Calcerrada et al., 2004), на Корсике (Coreau, Martin, 2007) и в других местах Северо-Западного Средиземноморья (Russo, 2006).

Проводятся исследования по выявлению роли подлеска и травянистого яруса в функционировании монодоминантных зрелых субсредиземноморских лесов. G. Zhou et al. (2022) говорят о том, что биоразнообразие нижних ярусов и подлеска может поддерживать выполнение зрелыми лесами экосистемных услуг.

Большое количество исследований в Средиземноморском регионе посвящено функционированию лесных почв. Биогенные летучие органические соединения повсеместно присутствуют в почвах и играют значительную роль в их функционировании. Они обеспечивают широкий спектр биологических взаимодействий между атмосферой, почвой, растительностью и почвенной микробиотой. В результате исследований (Mu et al., 2022) было показано, что состав и концентрация почвенных летучих органических соединений варьируются в зависимости от доминирующего вида в средиземноморских редколесьях и дубовых лесах. Их состав и концентрация также зависят от температуры и влажности почвы и активности почвенной микробиоты.

A. Forner et al. (2020) исследуют влияние фрагментации на способность дубовых лесов противостоять негативным воздействиям засухи. Выявлено, что фрагментация лесов поддерживает функционирование дубов и смягчает водный стресс, испытываемый ими во время засухи. Особенно актуально данное исследование в условиях продолжающегося изменения климата. Отмечено, что в более сухих условиях в небольших участках леса ослабление воздействия засухи на функционирование деревьев было сильнее, тем самым авторы утверждают, что влияние фрагментации на функционирование деревьев возрастает во время сильной засухи.

Проводятся исследования по выявлению связи между дефолиацией и разнообразием в различных древостоях (Iacopetti et al., 2019). Известно, что разнообразие деревьев расширяет экосистемные функции леса и повышает устойчивость леса. G. Iacopetti et al. (2019) выявили, что в Италии наблюдается общая тенденция к увеличению дефолиации в древостоях с высоким разнообразием.

Изучается функционирование различных видов средиземноморской растительности в условиях изменения климата и показана их устойчивость. Так, J. C. Pérez-Girón et al. (2020) выявили, что осадки не являются ограничивающим фактором для экосистем атлантического каштанового леса, а лимитирующим фактором первичной продукции каштана является среднегодовая температура.

Представляют интерес результаты D. Liu et al. (2018) по изучению влияния длительной засухи в средиземноморском дубовом лесу. Авторы (Liu et al., 2018) выявили, что длительная засуха (17 лет) с природными экстремальными явлениями усиливает изменение растительности, что может привести к потенциальным экологическим последствиям для функций и услуг средиземноморской экосистемы в будущем.

R. S. de Dios et al. (2019) провели классификацию и картографирование смешанных лесов испанского Средиземноморья. В работе (de Dios et al., 2019) авторы показали, что 21% от общей площади средиземноморских лесов в Европе приходится на Испанию. Также в (de Dios et al., 2019) отмечается, что смешанные леса в Средиземноморье составляют значительную долю от общей площади лесов. Описанию лесов, функционирующих в схожих условиях

внешней среды (средиземноморский климат и его производные) в различных регионах мира, посвящены работы (Wilcox, 1996; Barbour et al., 2007; Beard et al., 2013). J. S. Beard et al. (2013) изучали леса в Северо-Западной Австралии; M. Barbour et al. (2007) – в Калифорнии; K. Wilcox (1996) – в Чили.

T. Jakovljević et al. (2019) подчеркивают уникальность и хрупкость экосистемы Средиземноморья и проводят исследования по оценке воздействия загрязнения воздуха на состояние лесных экосистем на примере Восточного побережья Адриатики. T. Jakovljević et al. (2019) на примере средиземноморских лесов, состоящих главным образом из *Quercuspubescens*, *Quercusilex*, *Pinushalepensis*и *Pinusnigra*, провели отбор проб, измерения и анализ атмосферных осаждений, питательных веществ для листьев, дефолиации и роста растений путем сбора вод с осадкомеров. H. García-Gómez et al. (2018) проводят исследование поступления азота из атмосферы в лесных экосистемах Средиземноморья, как одних из наиболее ценных мест обитания. L. Aguillaume et al. (2017) исследовали сухое осаждение и поглощение азота пологом в четырех средиземноморских лесах из каменного дуба (*Quercusilex*) на Пиренейском полуострове. Исследование L. Aguillaume et al. (2017) показало, что взаимодействие сухого осаждения, выщелачивания и поглощения в пологе леса было различным в зависимости от климата исследуемого участка и характеристик качества атмосферного воздуха.

Средиземноморские лесные ландшафты подвержены высокой пожароопасности (Gonçalves, Sousa, 2017; Chergui et al., 2018; Baudena et al., 2019), вследствие чего значительно сокращается ландшафтное и биологическое разнообразие (Blondel, Aronson, 1995), а также уменьшается площадь этих уникальных ландшафтов. В работе (Quézel et al., 1999) подчеркивается, что средиземноморские леса очень ценны для биоразнообразия Европы, поскольку в этих лесах количество древесных видов почти в два раза больше, чем в лесах Центральной и Северной Европы. A. C. Gonçalves and A. M. Sousa (2017) анализируют лесные пожары в Португалии и Средиземноморье. A. C. Gonçalves и A. M. Sousa (2017) указывают, что в период 1980–2015 гг. наибольшее среднее количество пожаров наблюдается в Португалии и Испании, а по среднему размеру площади возгораний на один пожар лидируют Хорватия и Греция. M. Baudena et al. (2019) указывают, что повышенная засушливость не способствует восстановлению лесов Средиземноморья после пожара и повторные пожары могут привести к замещению лесов Средиземноморья в кустарниковые формации, где растет легковоспламеняющаяся растительность, которая быстро восстанавливается после пожара. R. S. De Dios et al. (2019) описывают проблему, связанную с тем, что смешанные леса практически не представлены в классификациях растительности и картах растительности стран Средиземноморского бассейна, хотя они составляют важную часть Средиземноморской лесной зоны. Говоря об этом, авторы указывают на тот факт, что многие исследователи рассматривают смешанные леса только как промежуточные или сукцессионные стадии развития лесов, состоящих из одной доминирующей породы деревьев. M. Baudena et al. (2019) подчеркивают, что учет пожаров является основополагающим при моделировании растительности средиземноморского типа в сценариях изменения климата. Также пожары влияют на функционирование лесных экосистем на локальном уровне. B. Chergui et al. (2018) провели исследования на африканском краю бассейна Западного Средиземноморья (частично горы Эр-Риф, север Марокко), леса из пробкового дуба и соснового леса, которые являются наиболее часто выгорающими лесными массивами в этом регионе, и показали локальные особенности лесов, которые влияют на подверженность пожарам и устойчивость к последствиям пожаров. Исследования выполненные K. X. Soulis et al. (2021) показывают, что крупный лесной пожар в Аттике (Греция), который затронул водораздел ручья Ликорема, предоставил возможность для углубленного изучения влияния лесных пожаров на гидрологический баланс естественных водоразделов Средиземноморья. V. Bacciu et al. (2021) подчеркивают негативное влияние пожаров на экономическое развитие Средиземноморского региона в целом и локальных местообитаний лесных ландшафтов.

Активно исследуется изменение климата в Средиземноморье и последствия, которые оказывают эти изменения на функционирование лесных ландшафтов (Marino et al., 2005; Peñuelas et al., 2017; Nunes et al., 2021; Suárez-Muñoz et al., 2023). J. Peñuelas et al. (2017) подчеркивают, что усиление засушливости, главным образом из-за уменьшения количества осадков и из-за повышения температур, вероятно, является главной угрозой разнообразию и выживанию средиземноморских лесов. L. J. R. Nunes et al. (2021) указывают также на тот факт, что изменение климата в средиземноморских лесных ландшафтах способствует появлению вредителей и распространению инвазивных видов, что непосредственно оказывает влияние на состояние леса. M. Suárez-Muñoz et al. (2023) указывают, что климатические изменения в дальнейшем неблагоприятно скажутся на функционировании сосновых лесов и постепенно будет происходить замещение и переход от чисто сосновых к дубовым и хвойно-дубовым смешанным лесным массивам. C. Marino et al. (2005) показали, как изменение климата влияет на изменение углеродного цикла в лесах Южной Италии. R. Ogaya and J. Peñuelas (2021) в ходе натурных экспериментов создания искусственной засухи показали, что в средиземноморских дубовых лесах небольшое долгосрочное снижение доступности воды оказало сильное воздействие на рост стволов деревьев, смертность и видовой состав, что привело к изменениям в функционировании, связанном с изменениями в росте, составе и распределении видов, о чём свидетельствует непрерывная замена основных пород деревьев субдоминантными, которые лучше приспособлены к жарким и сухим условиям внешней среды. N. Hidalgo-Triana et al. (2023) показывают высокую уязвимость лесов Западного Средиземноморья, расположенных на юге Испании, от климатических изменений и говорят о том, что последствия изменения климата станут ощутимы к середине XXI столетия, когда большинство типов лесов будут испытывать климатический стресс.

Большое количество работ посвящено экосистемным услугам, которые оказывают средиземноморские лесные ландшафты (Blondel, 2006; Peñuelas et al., 2017; Morán-Ordóñez et al., 2018; Morán-Ordóñez et al., 2021; Orenstein, 2021). J. Blondel (2006) подробно рассматривает более чем двухтысячелетнюю историю освоения Средиземноморья и влияние (как положительное, так и отрицательное), которое оказало это освоение на экосистемы и биоту Средиземноморья. В работе (Blondel, 2006) показано, что взаимодействие между компонентами экосистем и человеческим обществом на различных отрезках исторического развития в Средиземноморье сформировалось в результате сложной «коэволюции». D. E. Orenstein (2021) описывает различные экосистемные услуги, которые оказывают сосновыми и смешанными лесами по всему Средиземноморскому бассейну, и показывает на примере сосновых лесов Израиля оценку культурных экосистемных услуг.

A. Morán-Ordóñez et al. (2021) указывают, что обеспечение экосистемных услуг средиземноморскими лесами будет поставлено под угрозу при повышении температуры воздуха более чем на 2°C. Это исследование (Morán-Ordóñez et al., 2021) подводит нас к мысли, что изменение климата приведет к общему сокращению предоставления регулирующих экосистемных услуг (например, накопление углерода, регулирование количества и качества пресной воды) и общему увеличению числа пожаров, выгоревших площадей и в целом к увеличению связанных с климатом опасностей для лесов к 2100 году. Также A. Morán-Ordóñez et al. (2021) указывают, что прогнозируется значительное сокращение ареала и пригодности среды обитания для наиболее чувствительных к засухе лесных видов, в то время как условия среды обитания станут доступными для более устойчивых к засухе ксерофитных видов и их количество останется стабильным или даже увеличится.

Функционирование и динамика лесных средиземноморских ландшафтов в последние годы активно исследуется с использованием дистанционных методов исследования и географических информационных систем (ГИС), а также с использованием беспилотных летательных аппаратов. Большое число исследований с использованием ГИС посвящено оценке и моделированию изменений лесных ландшафтов Средиземноморья в результате пожаров (Tabara

et al., 2003; Bentekhici et al., 2020; Chouvardas et al., 2022). R. Ogaya et al. (2014) оценивают рост биомассы деревьев и отмирание средиземноморских дубовых лесов с использованием спутниковых данных. ГИС активно применяется для расчетов различных индексов, показывающих степень деградации лесных ландшафтов (Modica et al., 2015).

Большое количество исследований по изучению субсредиземноморских лесных горных ландшафтов проводится и отечественными учеными. Исследования направлены на изучение биоразнообразия лесных экосистем, условий их произрастания, текущего состояния (Демина и др., 2015; Иваненко, 2020; Биоразнообразие биомов России…, 2020; Постарнак, 2020), особенности их функционирования (Петрушина и др., 2021; Петрушина, 2021). При этом следует отметить, что бореальные равнинные лесные ландшафты в России имеют более длительный период изучения и по ним имеется большой объем научных работ.

На территории восточного побережья Черного моря проводятся крупномасштабные ландшафтные исследования с целью выявления пространственных закономерностей формирования растительного покрова приморских ландшафтов гемиксерофитных субсредиземноморских лесов и редколесий полуострова Абрау и средиземноморской флоры в государственном природном заповеднике «Утриш» (Чернодубов, Руденок, 2015; Бочарников и др., 2019; Иваненко, 2021; Петрушина, 2021; Bocharnikov et al., 2019). А. И. Чернодубов и Я. Г. Руденок (2015) рассматривают разнообразие лесообразующих древесных пород и указывают, что хвойные породы являются доминирующими в прибрежной части заповедника, а дубравы базовые фитоценозы, которые формируют облик лесного фонда заповедника «Утриш». Проанализированы катенарные закономерности произрастания субсредиземноморской растительности в связи с особенностями увлажнения, влагообеспеченности, крутизной склонов (Бочарников и др., 2019; Bocharnikov et al., 2019).

Горные леса также активно исследуются в Восточном Причерноморье на территории Абхазии (Сангулия, 2013; Сангулия, Сиволапов, 2013; Бебия, 2021; Koba et al., 2020). Т. Б. Сангулия указывает (Сангулия, 2013), что в Абхазии буковые леса занимают почти половину от общей площади лесов, а пихтовые и пихто-еловые леса – приблизительно 1/4 часть площади лесов Абхазии. Т. Б. Сангулия и А. И. Сиволапов (2013) выявили, что в буковых лесах Абхазии основную массу древостоя составляют деревья второго возрастного поколения (около 60%). С. М. Бебия (2021) исследует особенности распространения, формирования и ценотической динамики лесов из ольхи бородатой (*Alnusbarbata C. A. Mey.*), а также показывает экологические функции и роль ольховых лесов в сложении лесного покрова региона. V. P. Koba et al. (2020) изучали каштановые леса Абхазии. В целом исследованию растительных сообществ широколиственных лесов Колхидской низменности в Западном Закавказье посвящена работа Н. Б. Ермакова с соавторами (Ермаков и др., 2021).

Средиземноморские леса Черноморского побережья активно изучаются в Турции (Köse, Başkent, 2001; Ozcelik, 2009; Keleş et al., 2016; Coşkun M., Coşkun S., 2017; Kavgacı et al., 2021). S. Köse и E. Z. Başkent (2001) подчеркивают, что в пределах Восточного Причерноморья в Турции леса сильно деградировали и истощились. В то же время S. Keleş et al. (2016) подчеркивают, что в последние годы состояние лесов в причерноморских регионах Турции улучшилось и ценность лесов изменилась с экономической на экологическую и социокультурную. M. Coşkun и S. Coşkun (2017) изучали распространение маквисовых зарослей в бассейне Карабук-Сафранболу (Западное Причерноморье, северо-запад Турции). В результате исследований они показали, что в бассейне Карабук-Сафранболу, который расположен в пределах 100 км от береговой линии и является районом, где преобладает средиземноморский климат, произрастают европейско-сибирские и средиземноморские виды растений, и данный район по природным условиям схож с Средиземноморским регионом, Калифорнией, Чили, Капской областью и Австралией.

Изучению субсредиземноморских лесов на территории Крымского полуострова посвящен цикл работ Ю. В. Плугатаря (Плугатарь, 2015; Плугатарь, Корженевский, 2016; Плуга-

тарь и др., 2019; Плугатарь и др., 2022), В. В. Корженевского (Корженевский, 1981; Корженевский, 1982; Корженевский, Шеляг-Сосонко, 1983; Корженевский, Клюкин, 1989; Корженевский, Багрикова, 1997), Л. П. Мироновой (Миронова, 2017; Миронова, 2019; Миронова, 2020), Н. Б. Ермакова с соавторами (Ermakov et al., 2021a; Ermakov et al., 2021b), В. А. Бокова с соавторами (Ландшафтно-экологический стационар…, 1999; Ландшафтно-геофизические условия…, 2001; Трансформация ландшафтно-экологических процессов…, 2010) и др.

В работе (Плугатарь, 2015) Ю. В. Плугатарь приводит характеристику лесов Крымского полуострова с позиций лесной типологии, происхождения растительности региона, истории их эксплуатации, экологической роли, продуктивности древостоев и оптимизации использования их потенциала в природоохранных и рекреационных целях на основе экологического лесоводства и стратегии устойчивого развития.

Также в Горном Крыму проводятся исследования регионального и локального масштабов по изучению сосновых (Плугатарь и др., 2019), ольховых (Корженевский, 1981), буковых (Синицын, 2010; Манышев и др., 2018; Роговой, 2019), грабовых (Гаркуша, 2008) и дубовых лесов (Плугатарь и др., 2013). Ю. В. Плугатарь с соавторами (2019) изучают особенности территориального распределения, продуктивности и типологической структуры естественных древостоев сосны в Горном Крыму, среди которых преобладают насаждения сосны крымской. Л. Я. Гаркуша (2008) показывает возрастную структуру, естественное возобновление и природоохранное значение грабовых лесов Горного Крыма и отмечает, что грабовые леса Горного Крыма во многом сходны с грабовыми лесами юго-восточной части Франции, предгорий Альп, северных Апеннин, Балканского полуострова. В. В. Корженевский и Ю. В. Плугатарь (2016) исследуют факторы внешней среды, влияющие на произрастание лесов *Pinussylvestrisvar. hamata*Steven в Горном Крыму. В. В. Косолапов (2016) рассматривает в сравнении характеристику уникальной области полусухих субтропиков Южного берега Крыма и Черноморского побережья Кавказа.

Особенности типологической структуры средиземноморских лесных формаций в Горном Крыму исследовал Н. А. Пшеничников (2022). В лесах Юго-Восточного Крыма проводятся исследования по изучению возрастной структуры ценопопуляций липы опушённостолбиковой (*Tiliadasystyla*) (Кузнецов, 2015), фисташки туполистной (*Pistaciamutica* Fisot. & C. A. Mey) (Летухова и др., 2016).

На территории Горного Крыма и Южного берега Крыма некоторыми исследователями изучались реликтовые субсредиземноморские леса из можжевельника высокого (*Juniperetaexcelsae*). В частности, В. В. Фатерыга (2010) исследовала эколого-биологическую структуру флоры высокоможжевеловых лесов Южного берега Крыма в условиях рекреационного воздействия. Эколого-биологическая структура этих лесов в целом исследовалась также Ю. Р. Шеляг-Сосонко и Я. П. Дидухом (1975), В. Н. Голубевым (1989), И. В. Голубевой (1981), в том числе и частично на локальном уровне. В. В. Фатерыга (2010) проводила изучение эколого-биологической структуры флоры можжевеловых лесов Южного берега Крыма в 2007–2009 гг. на 8 стационарных площадях, расположенных в пределах ареала можжевеловых лесов (от заказника «Мыс Айя» до г. Судака).

Субсредиземноморская и средиземноморская растительность исследуется во многих работах в рамках описания растительного покрова отдельных районов Юго-Восточного Крыма – Карадага (Миронова, Фатерыга, 2015), полуострова Меганом (Миронова, Шатко, 2013), хребта Тепе-Оба (Шатко, Миронова, 2011), хребта Узунсырт (Миронова, Шатко, 2010), Баракольской котловины (Миронова, Шатко, 2010), Эчкидага (Клюкин и др., 1990; Ключкина, Прокопов, 2019) и пр., а также Крымского полуострова в целом (Ена и др., 2004; Ена, 2012).

Имеются отдельные попытки проведения балансовых исследований в Горном Крыму. Стоит отметить исследования, проводимые под руководством И. П. Ведя (Ведь, 1971; Ведь, 1974; Ведь, 1978; Ведь, Федосеев, 1967). Однако они выполнялись в довольно ограниченных локациях, что затрудняет их экстраполяцию и сравнение с современными данными.

В. П. Коба (2001) провел оценку динамики водного баланса хвойных лесов Горного Крыма. Исследования были выполнены в мае – октябре 2000 г. на южном макросклоне Главной гряды Крымских гор в районе хребта Иограф в насаждениях сосны крымской в параллельной оценке динамики аналогичных процессов на участках, пройденных огнем, где лес после пожара был полностью вырублен (Коба, 2001).

Т. В. Бобра и А. И. Лычак (2004) разработали схему мониторинга экологического состояния лесов восточного южнобережья Крыма. В. П. Коба (2000) и В. Г. Кобечинская и Т. С. Онищенко (2017) рассматривали вопросы оценки последствий пожаров на территории Южного берега Крыма. Вопросами мониторинга также занимались Ю. В. Плугатарь и А. Ю. Астапов (2007).

Т. В. Бобра (2005, 2007) провела оценку ландшафтно-экологических условий (типов геотопов), индицирующихся главным образом по изменению растительных сообществ с различной вертикальной структурой, степенью увлажнения и биомассой на локальном уровне в пределах отдельных участков на территории Карадагского заповедника.

На территории Крымского полуострова проводятся стационарные исследования условий произрастания и функционирования лесных экосистем, в частности, субсредиземноморских ландшафтов. В 1993 году заложен Карадагский ландшафтно-экологический стационар, на котором выполняются регулярные измерения температуры воздуха, количества атмосферных осадков, влажности почв, уровня грунтовых вод. Изучается вертикальная структура различных типов лесных экосистем, фитометрия, фенология, проводятся комплексные исследования по экологическому состоянию лесов (Ландшафтно-экологический стационар…, 1999; Ландшафтно-геофизические условия…, 2001; Бобра, Багрова, 2002; Бобра, Лычак, 2004), оценивается влияние увлажнения на произрастание лесов (Боков, Яковлева, 2020).

В то же время нужно понимать, что функционирование лесных экосистем главным образом определяется радиационным, тепловым и водными балансами рассматриваемых ландшафтов (Арманд, 1975; Сочава, 1978; Солнцев, 1981; Беручашвили, 1986; Беручашвили, 1990; Мамай, 1992). Важность изучения радиационного баланса и поступления солнечной радиации определяется их ведущей энергетической ролью в исследованиях структуры и функционирования ландшафтов. Именно их перераспределение в ландшафте определяет горизонтальную и вертикальную структуру.

Теоретические основы изучения радиационного баланса территории заложены М. И. Будыко (1956) и М. Е. Берляндом (1956). Но представленные ими методики опирались на определенный ряд метеорологических параметров, не затрагивая особенности растительного сообщества на изучаемой территории. Изучению радиационного баланса лесных сообществ уделяли внимание Д. П. Акимова (1972), В. А. Алексеев (1975), Н. Н. Выгодская (1967, 1977), Н. В. Зукерт с соавторами (1967), Н. А. Битюков (2012a), И. С. Угаров (2018).

Для территории лесов Крымского полуострова в целом имеются довольно скудные сведения о значениях поступающей радиации и радиационном балансе (Корсакова, 2015; Kondratyev, 1960; Terez E. I., Terez G. A., 2002). Примером расчета радиационного баланса и его описания в Крыму на региональном и локальном уровнях являются работы В. А. Бокова с соавторами (Ландшафтно-экологический стационар..., 1999; Ландшафтно-геофизические условия…, 2001; Трансформация ландшафтно-экологических процессов…, 2010), Р. В. Горбунова с соавторами (Горбунов и др., 2020a; Горбунов и др., 2020b), В. О. Смирнова (2009, 2012), В. В. Антюфеева (1988). Однако комплексному подходу в изучении поступления солнечной радиации и радиационного баланса локального уровня, отдельных типов растительных сообществ уделено недостаточно внимания.

Е. И. Ергина с соавторами (2017) указывают, что построена карта радиационного баланса территории Крымского полуострова, однако саму карту не приводят. Л. Я. Гаркуша и Л. А. Багрова (2012) указывают что радиационный баланс в пределах дубовых лесов северного макросклона Крымских гор составляет в среднем за год 55,4 ккал/см^2. В. В. Антюфеев

(1988) приводит расчеты радиационного баланса и картограммы для территории западной и центральной части Горного Крыма, которые, к сожалению, не затрагивают исследуемый нами район. В своей работе В. В. Антюфеев (Антюфеев, 1988) приводит соотношение составляющих теплового и водного балансов в ландшафтных районах Горного Крыма и указывает, что на Карадаге значения радиационного баланса оставляют 2365 МДж/м^2.

На региональном уровне проводились исследования радиационного баланса в пределах ландшафтов дубовых, буковых и сосновых лесов (Горбунов и др., 2020a; Горбунов и др., 2020b). В. О. Смирнов (2009, 2012, 2016) исследовал значения радиационного баланса на локальном уровне на территории заповедника «Мыс Мартьян». Локальные исследования солнечной радиации также проводятся в Никитском ботаническом саду (Фурса и др., 2006; Корсакова, 2015). Годовая величина прямой солнечной радиации в данном районе составляет 2613 МДж/м^2, рассеянной – 1792 МДж/м^2, суммарной – 4405 МДж/м^2 (Корсакова, 2015). Некоторые данные по радиационному балансу и его составляющим для Крыма приведены в работах Н. И. Гойсы (1961, 1964), А. А. Борисова (1963), Е. П. Барашковой (1961), М. С. Чумаковой (1947), С. И. Сивкова (1940), К. Я. Кондратьева и Г. В. Розенберга (1959) и др.

Важность изучения теплового баланса, его составляющих и их соотношение между собой определяется выявлением закономерностей, определяющих метеорологический и гидрологический режим ландшафтов, и возможностью прогноза и расчета основных процессов и явлений, характеризующих структуру и функционирование. Все важнейшие природные процессы наиболее интенсивно протекают вблизи земной поверхности. Таким образом, сведения о тепловом балансе поверхности и прилегающих слоев атмосферы имеют большое значение при изучении причинно-следственных связей и закономерностей всего комплекса природных процессов (Будыко, 1956).

Преобразование поступающей на земную поверхность солнечной энергии оказывает большое влияние на динамику всех экзогенных природных процессов. Следовательно, на основе данных по тепловому балансу возможно проводить исследования многих географических закономерностей.

Обмен теплом между поверхностью и атмосферой происходит посредством потоков длинноволновой радиации, а также потоков явного и скрытого тепла (Ипполитов и др., 2011).

Теоретические основы изучения теплового баланса земной поверхности заложены в работах А. И. Воейкова (1884), М. И. Будыко (1956), Т. Г. Берлянда (1948). Было отмечено, что прямых измерений составляющих теплового баланса недостаточно для полноценного климатологического описания, что привело к использованию косвенных методов расчета с помощью основных климатических параметров: температура и влажность воздуха, осадки, ветер, температура подстилающей поверхности и др. Такой подход позволил подстраивать методику под необходимый масштаб исследования с доступными метрологическими данными. Однако в большинстве случаев применяются методы, рассчитанные для значительных периодов, в то время как расчет составляющих теплового баланса за короткие сроки не всегда возможен.

Особенностям теплообмена атмосферы с различным типом подстилающей поверхности уделяет внимание А. В. Павлов (1979). Помимо общей методики выделяются частные направления расчета составляющих теплового баланса для таких поверхностей, как водные объекты, почвенный покров, растительный покров и ледники (Павлов, 1979; Исаков, Лаврова, 2016; Прохорова и др., 2021).

Вопросами изучения теплового баланса задаются во всем мире (Brunt, 1932; Christen et al., 2008; Fuchs et al., 2021; Wang et al., 2021; Bhattacharya et al., 2022; Vecellio et al., 2022; Njuki et al., 2023). Земной баланс климата рассматривается с точки зрения энергетического баланса (Ander, 2021), а распределение тепла в земной поверхности описывается моделями потока тепла в почве (Bhattacharya et al., 2022). В процессе исследований используются как методы дистанционного зондирования Земли, так и стационарные градиентные наблюдения (Brunt, 1932). В процессе описания составляющих теплового баланса уделяется внимание разделе-

нию потоков на явное и скрытое тепло (Wang et al., 2021; Njuki et al., 2023). Явное тепло – это тепло, передаваемое телом или термодинамической системой, при котором теплообмен изменяет температуру тела или системы, но оставляет неизменными макроскопические переменные тела или системы, такие как объем или давление (Partington, 1949; Prigogine, Defay, 1954; Adkins, 1975; Landsberg, 1978), а скрытое тепло – теплота, высвобождаемая или поглощаемая термодинамической системой при изменении своего состояния, но не сопровождаемая изменением температуры (Герасимов и др., 1969). Оно наблюдается при фазовых переходах: плавлении, парообразовании, отвердевании и т. д. (Perrot, 1998; Clark, 2004). Также в работах зарубежных авторов отмечается сосредоточенность на одном определенном элементе баланса с его особенностями или природном явлении, оказывающем влияние на изменение изучаемого параметра.

Изучению теплового баланса лесных сообществ уделяли внимание Н. А. Сурова (2018), Н. А. Битюков (2012b). Радиационным балансом как элементом теплового занимались Д. П. Акимова (1972), В. А. Алексеев (1975), Н. Н. Выгодская (1967, 1977), Н. В. Зукерт с соавторами (1967), Н. А. Битюков (2012a), И. С. Угаров (2018).

Примером расчета элементов теплового баланса лесов и их описания в Крыму на региональном и локальном уровнях являются работы И. П. Ведя (Ведь, 1971; Ведь, 1974; Ведь, 1978; Ведь, Федосеев, 1967). Также в рамках комплексных исследований Юго-Восточного Крыма В. А. Боков описывал взаимодействие лесов с потоками тепла и радиации (Ландшафтно-геофизические условия..., 2001). Однако комплексному подходу в изучении поступления солнечной радиации, радиационного баланса и его распределения на локальном уровне, в отдельных типах растительных сообществ, уделено недостаточно внимания.

Несмотря на различие отечественного и зарубежного подходов, их общей главной целью является изучение причинных закономерностей, определяющих метеорологический и гидрологический режим различных географических районов, что позволяет прогнозировать важные с практической точки зрения гидрометеорологические процессы и явления (Будыко, 1956).

Теоретические основы изучения водного баланса территории Крымского полуострова заложены исследованиями М. А. Кочкина (1967), К. Т. Логвинова и М. Б. Барабаш (Климат и опасные..., 1982), В. А. Бокова с соавторами (Ландшафтно-геофизические условия..., 2001; Трансформация водного баланса..., 2011). В работе «Трансформация водного баланса в Крыму в XX веке – начале XXI века» (2011) проанализированы изменения элементов водного баланса на территории Крыма под влиянием изменения климата и хозяйственной деятельности, динамика расходов воды, трансформация земельных угодий, рассматриваются особенности формирования водного баланса на региональном и локальном уровнях, а также произведено районирование региона по характеру природного водного баланса, водопотребления, условиям использования транзитных и подземных вод. Предложены способы оптимизации водного баланса и качества воды с помощью физико-химических и ландшафтно-мелиоративных приемов. В настоящее время продолжаются работы по формированию методологии оценки водно-ресурсного потенциала Крымского полуострова (Дунаева и др., 2015; Кузнецов и др., 2021).

Примером расчета региональных и локальных характеристик водного баланса в Крыму могут служить работы В. А. Бокова с соавторами (Ландшафтно-геофизические условия..., 2001; Трансформация водного баланса..., 2011; Разработка экологически сбалансированных..., 2013), А. В. Зуева с соавторами (2020), Р. В. Горбунова с соавторами (2009; 2013), Л. М. Соцковой и В. О. Смирнова (2011), В. О. Смирнова (2009). В работе (Соцкова, Смирнов, 2011) предложены подходы к информационно-картографической интерпретации трансформации водного баланса Крыма, а также рассмотрены особенности построения информационно-картографических баз данных трансформации статей приходной и расходной частей водного баланса, подходы к их созданию и использованию.

Расчеты суммарного испарения для районов Горного Крыма выполнены В. Н. Дублянским (1966), водный баланс Главной гряды Крымских гор исследован в работе И. Г. Глухова (1959). Активно исследуется водный баланс ландшафтов бассейнов рек Крымского полуострова (Каюкова, 2016; Амеличев и др., 2019; Токарев и др., 2019). В то же время изучению водного баланса отдельных типов растительных сообществ на локальном уровне, произрастающих на территории Крымского полуострова, уделено крайне мало внимания (Коба, 2001; Плугатарь, Коба, 2017; Горбунов и др., 2022). Отдельные работы посвящены оценке водного баланса растительных сообществ для сельскохозяйственного производства (Тищенко, 2017; Гусев, 2023).

Как было показано, 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. На региональном уровне следует углубить анализ влияния климатических, геологических и биологических факторов на формирование ландшафтов, а также изучить взаимодействие лесных экосистем с окружающей средой в различных частях полуострова. С другой стороны, на топологическом уровне необходимо уделить внимание изучению локальной структуры лесных горных ландшафтов, их климатическим особенностям, распределению растительности и видового состава. Такие подробные исследования позволят выявить мельчайшие нюансы в функционировании этих ландшафтов, что, в свою очередь, окажется важным для разработки устойчивых стратегий управления природными ресурсами и сохранения биоразнообразия. Таким образом, осуществление комплексных исследований лесных горных ландшафтов на Крымском полуострове на обоих уровнях – региональном и топологическом – расширяет понимание об уникальных природных процессах в пределах горных лесных ландшафтов Крымского полуострова.

ГЛАВА 2

Факторы формирования и условия функционирования низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов Юго-Восточного Крыма

На территории Крымского полуострова субтропические лесные экосистемы представлены в основном пушистодубовыми и можжевеловыми формациями с примесью держидерева, скумпии кожевенной, грабинника (граб восточный). Эти сообщества представлены от побережья до высоты 300–350 м, где они либо сменяются типичными пушистодубовыми лесами и их производными с примесью грабинника и выше скальнодубовыми лесами с примесью грабовых и ясеневых лесов, либо поднимаются до края южного обрывистого известнякового склона яйлы.

Эти сообщества представлены, как правило, шибляковыми зарослями, представляющими собой густой низкорослый труднопроходимый лесной массив либо, наоборот, разреженные редколесья. Данные леса сформированы на границе своего ареала и обязаны своим формированием эффекту субтропического климата, который здесь формируется за счет циркуляционной позиции Южного берега Крыма. Северные холодные воздушные массы сюда не проникают, а южные и юго-западные задерживаются на склонах южной экспозиции Главной гряды Крымских гор. Юго-Восточный Крым, вместе с тем, находится в циркуляционной и инсоляционной тени, формируемой Главной грядой, что определяет высокую засушливость региона.

2.1. Географическое положение

Район исследования располагается в юго-восточной части Крымского полуострова (рисунок 2.1).

Понятие «Юго-Восточный Крым» часто встречается в научных публикациях. Однако чёткие границы этого региона до сих пор не определены.

Анализ публикаций показывает, что к Юго-Восточному Крыму авторы чаще всего относят территорию городских округов Судак и Феодосия. Однако они не связывают его выделение с административными единицами, а скорее с ландшафтными особенностями. Границы района приводятся по работе (Ландшафтно-геофизические условия…, 2001), с незначительными корректировками в силу того, что в (Ландшафтно-геофизические условия…, 2001) приводится картосхема границ. Уточнение границ произведено по линиям водоразделов, которые выступают естественными границами исследуемого района. Западная граница района проходит по водоразделу между реками Ворон и Шелен – хребту Голлер, вершинам Пиякья, Биюк-Криж, Ливаз-Кая. Северная граница проходит по главному водоразделу, разграничивающему бассейны рек, впадающих в Чёрное (несущих свои воды в южном направлении) и Азовское моря (несущих свои воды в северном направлении). Северная граница проходит по скалам Юван-Кая, хребту Хамбал, г. Кукушлу-Оба, г. Казас-Олан, г. Апалы, хребту

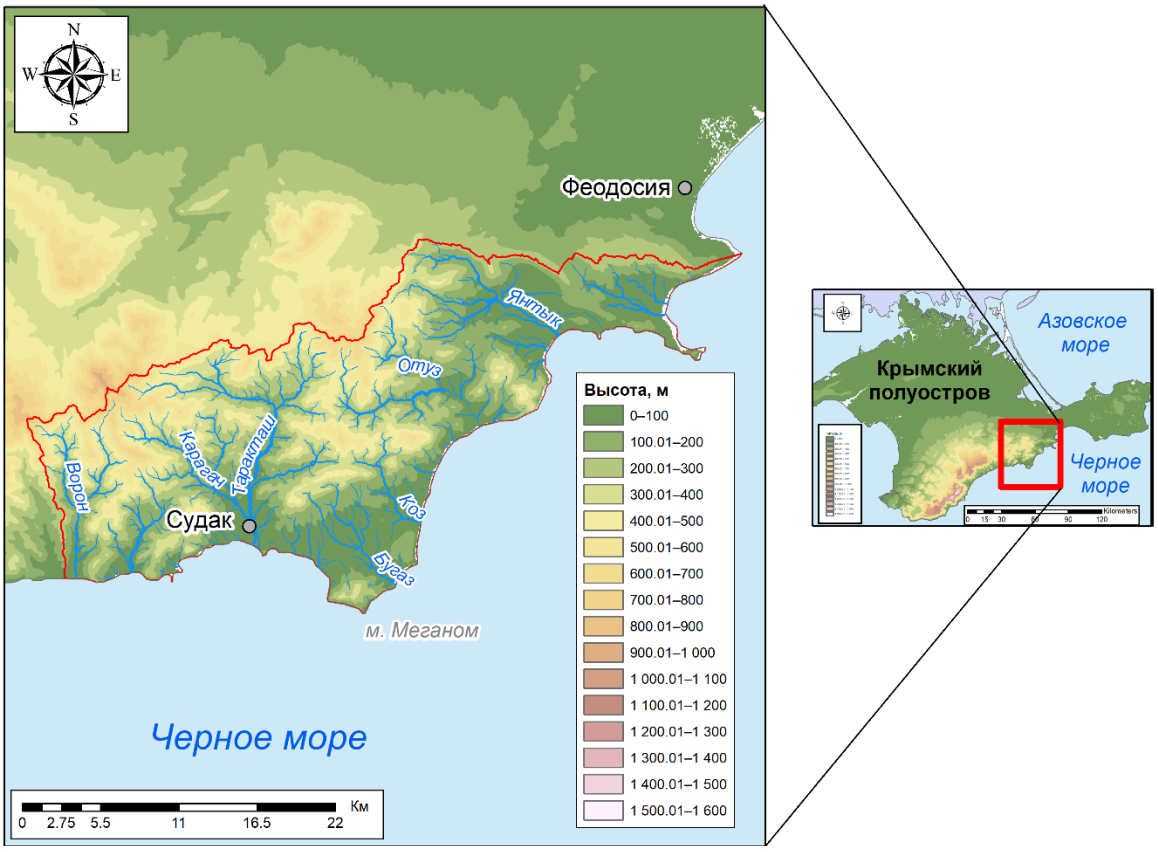


Рисунок 2.1. Географическое положение района исследования

Туар-Алан, г. Джады-Кая. Северо-восточная и восточная граница проходит по линии г. Кара-Оба, хребту Узун-Сырт, хребту Тепе-Оба и заканчивается в районе мыса Ильи.

Площадь района исследования составляет 567,8 км^2, а протяженность границы составляет 164,2 км. На севере от Юго-Восточного Крыма находятся отроги Крымских гор, постепенно переходящие в Присивашскую низменность, на востоке – Крымские горы, на западе – Феодосийский залив и прилегающие равнины. Существенное воздействие оказывает расположенное на юге Черное море, протяженность границы с которым составляет около 80 км.

2.2. Геологическое строение и рельеф

Рассмотрим более детально влияние геологического строения и рельефа на распространение субсредиземноморских лесных сообществ на территории Юго-Восточного Крыма.

Существует довольно большой спектр взглядов на геологическое строение юго-восточной части Крымского полуострова, ввиду сложного строения и сложной истории формирования.

Согласно геологической карте Горного Крыма, изданной в 1984 г. под редакцией Н. Е. Деренюк (1984), Юго-Восточный Крым довольно четко обосабливается в геологическом отношении. Северная и северо-восточная граница Юго-Восточного Крыма находится на стыке меловых и палеоген-неогеновых отложений, юго-западная граница проходит по титонским отложениям юры, а западная граница находится на стыке верхнеюрских и нижнеюрских отложений.

М. В. Муратов (1960) указывает, что большая часть Юго-Восточного Крыма находится в пределах Судакского синклинория и Судакско-Карадагской складчатой страны, а окраины частично попадают в Туакский антиклинорий и синклинорий Восточного Крыма.

По (Атлас. Автономна Республіка..., 2003), исследуемая территория в тектоническом отношении полностью расположена в пределах Горно-Крымского альпийского складчатого

надвигового сооружения. Дочетвертичные отложения исследуемого района представлены в основном юрскими отложениями. Здесь преобладают юрские известняки, песчаники, глины. Встречаются триасовые отложения таврической серии (песчано-глинистый флиш), а также триасовые аргиллиты и глины. В. В. Юдин (2018) указывает, что в районе Карадага представлены магматические породы (андезиты, базальты, туфы) среднеюрского возраста.

Четвертичные отложения представлены нерасчлененными элювиальными и делювиально-коллювиальными плиоцен-нижнечетвертичными отложениями. В районе полуострова Меганом распространены делювиально-пролювиальные четвертичные отложения. В долинах рек и водотоков широко представлены аллювиальные отложения.

В целом тектонические и геологические условия оказывают влияние на растительные сообщества в большей степени опосредованно – через рельеф местности, который сформировался в силу геологических и тектонических условий. Можно сказать, что в пределах рассматриваемого района прослеживается только частичная связь произрастания буковых и грабовых лесов на верхнеюрских отложениях. М. А. Кочкин (1967) отмечает, что известняки, по сравнению с другими породами, являются менее пригодными для развития почвенного и растительного покрова в силу слабого расчленения рельефа, сложенного известняками и слабого накопления продуктов разрушения породы. При анализе геологической информации отчётливо видно, что в Юго-Восточном Крыму имеется большое количество выходов коренных пород, в результате чего над ними невозможно формирование устойчивого лесного покрова и здесь формируются либо участки без растительных сообществ, либо крайне бедные степные сообщества.

Рельеф Юго-Восточного Крыма представлен горными хребтами в центральной и западной части и постепенно переходит в равнину на востоке. По данным цифровой модели рельефа Copernicus DEM (пространственное разрешение 30 м/пиксель), абсолютные высоты района изменяются от –4 до 917 м (рисунок 2.2).

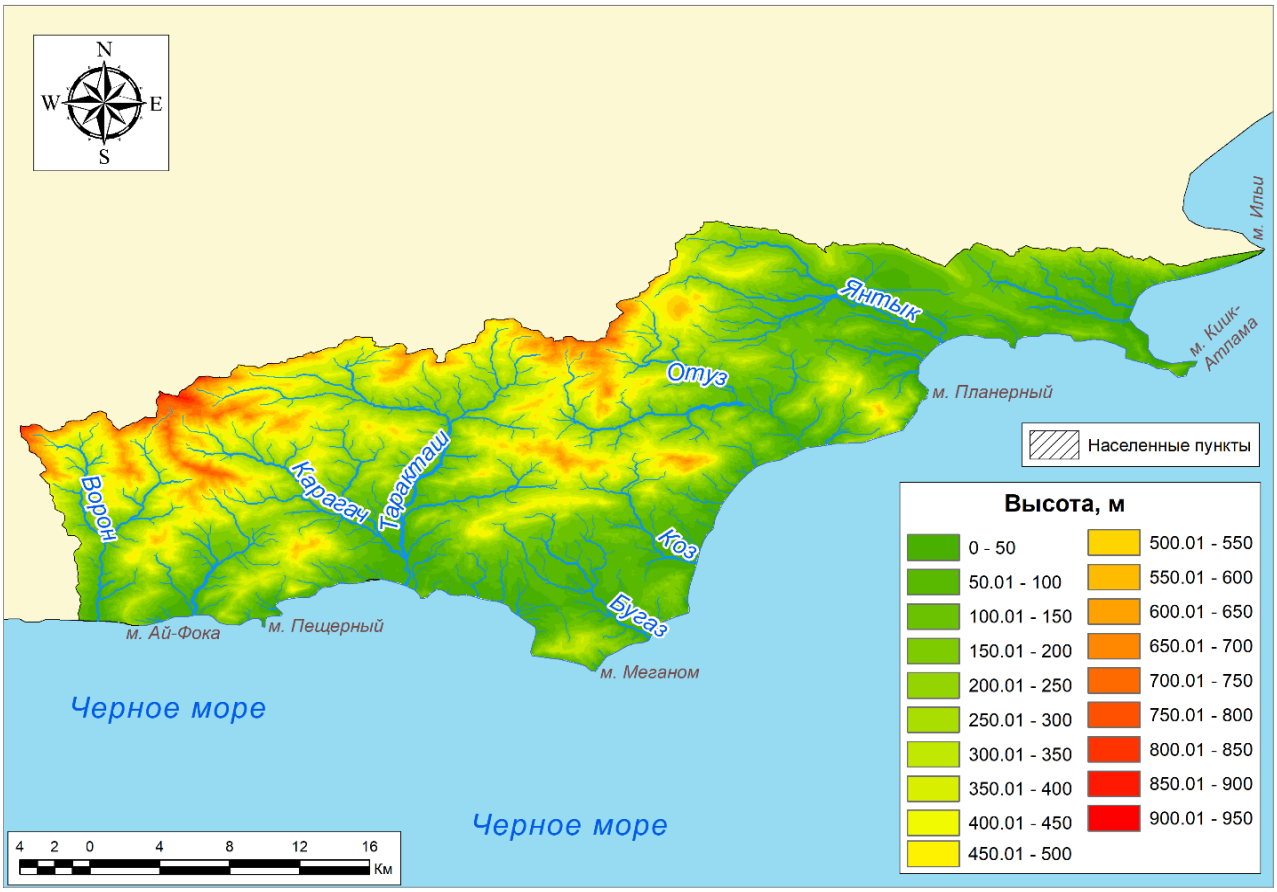


Рисунок 2.2. Абсолютные высоты Юго-Восточного Крыма

Лесные сообщества главным образом представлены в западной и центральной части Юго-Восточного Крыма, где представлены наиболее возвышенные участки территории. Рельеф района постепенно понижается с северо-запада на юг и юго-восток. Минимальные отметки абсолютных высот характерны для побережья Феодосийского залива.

Рельеф и его количественные характеристики оказывают влияние на распределение растительных сообществ в пределах Юго-Восточного Крыма. Можно утверждать, что степные сообщества в пределах Юго-Восточного Крыма занимают самые низкие участки (при этом средние значения высоты здесь составляют около 100 м), более высокое положение занимают дубовые шибляки со средним значением высоты в 230 м, затем – пушистодубовые леса (среднее значение высоты примерно 285 м), скальнодубовые леса (среднее значение высоты примерно 340 м) и наивысшее значение – грабово-буковые леса (среднее значение абсолютных высот примерно 470 м).

Наклон поверхности в пределах Юго-Восточного Крыма изменяется от 0 до 69,2 градуса. Среднее значение наклона поверхности в пределах Юго-Восточного Крыма составляет 13,9 градуса (рисунок 2.3). А. А, Клюкин (2007) отмечает, что из-за сложного рельефа в Юго-Восточном Крыму могут формироваться бедленды.

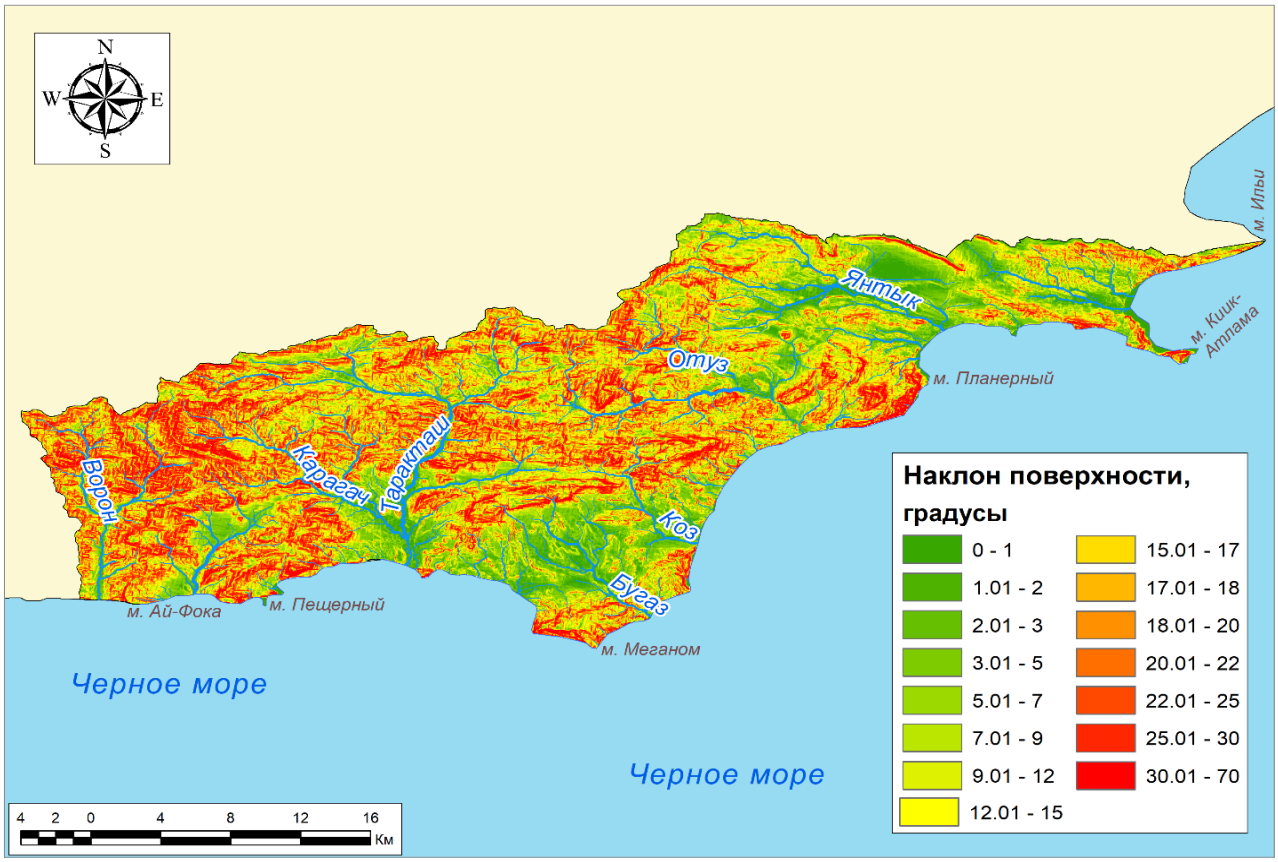


Рисунок 2.3. Наклон поверхности в пределах Юго-Восточного Крыма

Наибольшие значения наклона поверхности характерны для восточной и северной частей Юго-Восточного Крыма, а наименьшие – для западной (особенно в долине реки Янтык).

Глубина расчленения рельефа (рисунок 2.4) в пределах рассматриваемого района изменяется от 0 до 446 м. 73% территории Юго-Восточного Крыма характеризуются глубиной расчленения рельефа от 100 до 300 м/км^2, и только около 7% – глубиной расчленения более 300 м/км^2. Густота расчленения рельефа колеблется от 0 до 3,5 км/км^2 (рисунок 2.5). Наибольшие количество значений густоты расчленения рельефа в пределах района приходятся на диапазон значений от 0 до 1 км/км^2.

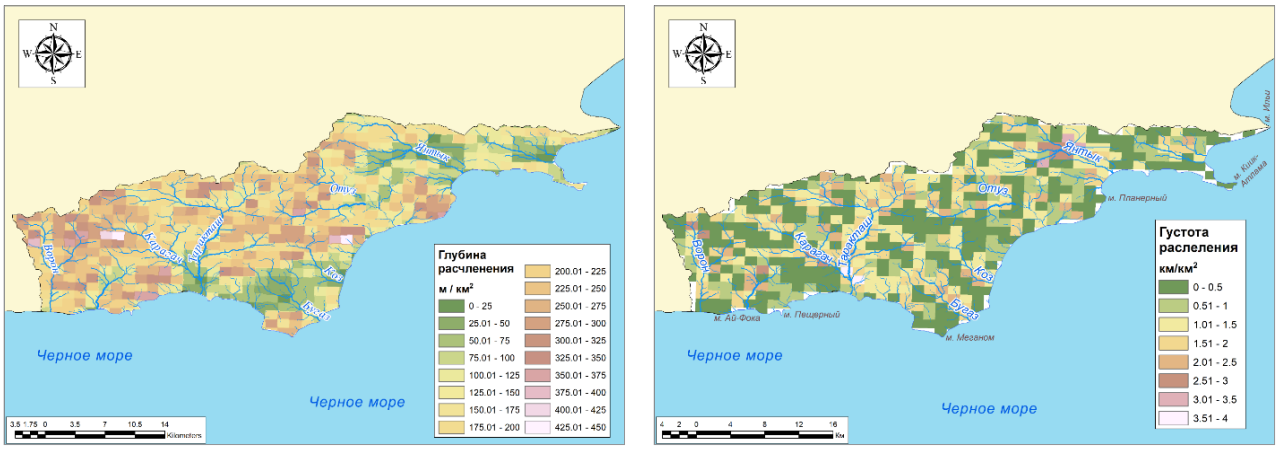


Рисунок 2.4. Глубина расчленения рельефа (слева) и густота расчленения рельефа (справа) в пределах Юго-Восточного Крыма

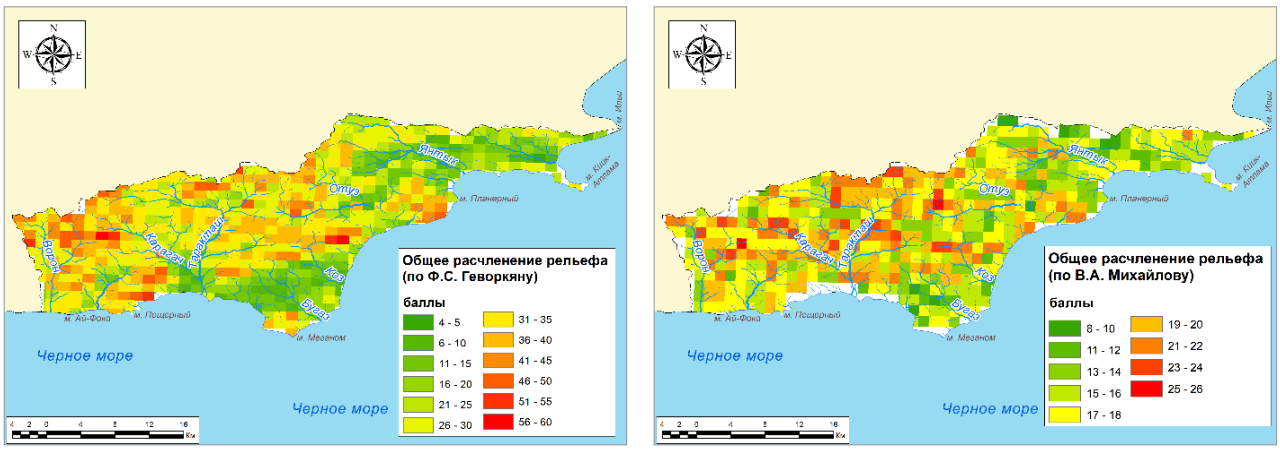


Рисунок 2.5. Общее расчленение рельефа в пределах Юго-Восточного Крыма: по Ф. С. Геворкяну (слева) и по В. А. Михайлову (справа)

Общее расчленение рельефа для района исследования, рассчитанное по методике В. А. Михайлова (2015), изменяется от 4 до 56 баллов, а по методике Ф. С. Геворкяна (1972) – от 8 до 25 баллов. При этом результаты, полученные для обеих методик, констатируют тот факт, что общее расчленение рельефа уменьшается с запада на восток (рисунок 2.5).

В целом в пределах рассматриваемого района территории с минимальным расчленением рельефа покрыты степными, псамофитными и галофитными сообществами, в то время как территории с наибольшим расчленением рельефа покрыты лесными сообществами.

Стоит также отметить, что склоны Юго-Восточного Крыма подвержены эрозионным процессам и в том числе оврагообразованию, что определяет перераспределение лесов по склонам. Большую роль в пространственной дифференциации лесов играют снегосборы. Рассчитанный для Юго-Восточного Крыма индекс мощности линейной эрозии SPI (StreamPowerIndex) показывает, что большая часть Юго-Восточного Крыма подвержена сильным эрозионным процессам (рисунок 2.6).

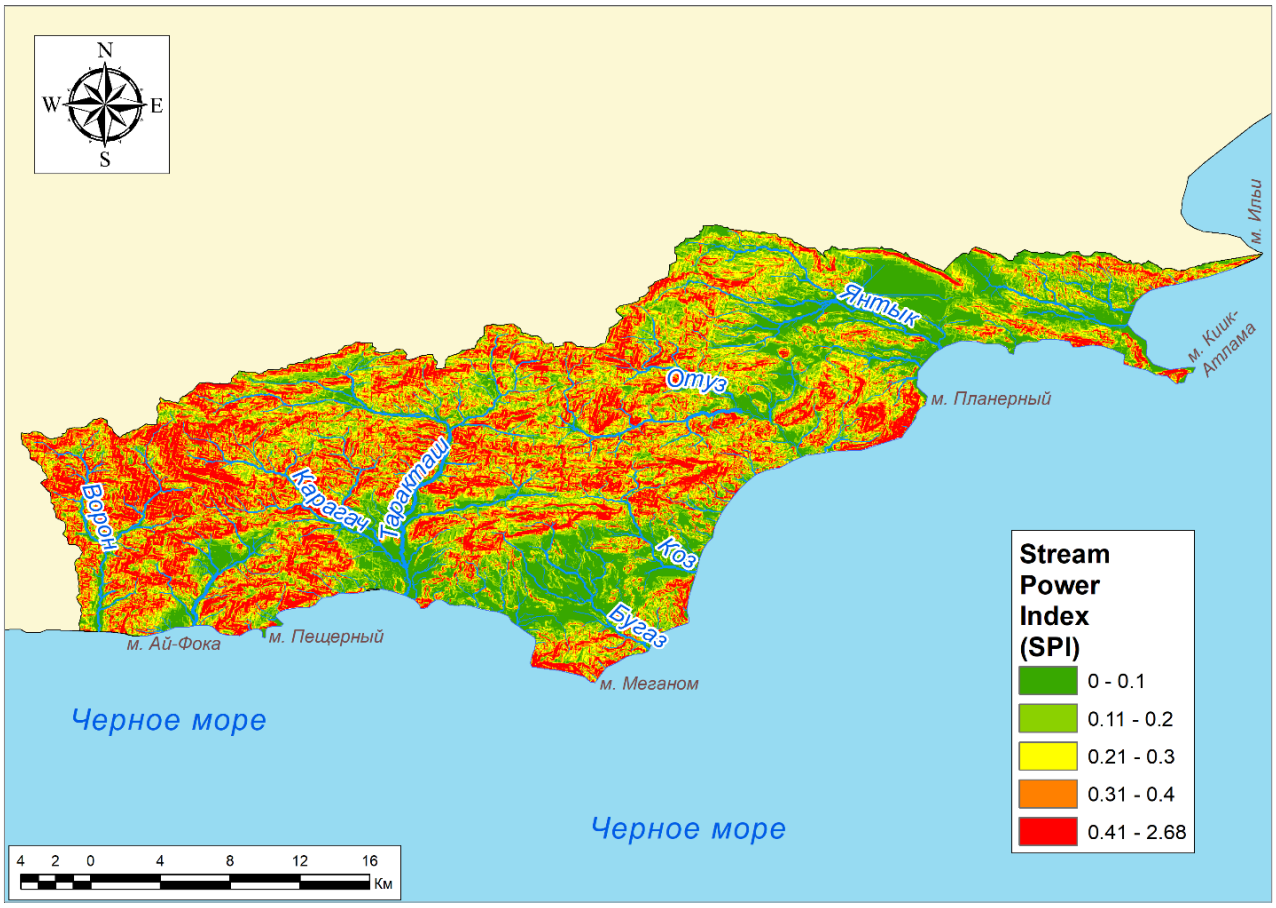


Рисунок 2.6. Значения индекса мощности линейной эрозии SPI (Stream Power Index) в пределах Юго-Восточного Крыма

2.3. Климат

В работе (Ландшафтно-геофизические условия..., 2001) отмечается, что территория Юго-Восточного Крыма характеризуется средиземноморскими чертами климата. Однако, несмотря на это, многие авторы, например, (Агроклиматический справочник…, 1959), указывают что в Юго-Восточном Крыму сильные морозы, средние минимумы температур и минимальные температуры в отдельные годы являются сильным лимитирующим фактором для развития субтропической растительности.

По (Атлас. Автономна Республіка..., 2003) среднегодовая температура воздуха в пределах Юго-Восточного Крыма увеличивается от 8 до 12 градусов Цельсия с северо-запада на юго-восток и с запада на восток. Согласно (Агрокліматичний довідник..., 2011), на метеостанции города Феодосии за год выпадает 512 мм осадков, в теплый период – 297 мм, а в холодный период – 215 мм. В то же время, согласно (Агрокліматичний довідник..., 2011), максимальное количество выпадающих осадков в год здесь составляет 700 мм, а минимальное – 265 мм. Среднегодовая температура составляет 12,1°С (Агрокліматичний довідник..., 2011).

Согласно (Ландшафтно-геофизические условия..., 2001), в Юго-Восточном Крыму за зимний период выпадает от 150 до 400 мм осадков, причем наибольшее количество осадков выпадает в северо-западной части района исследования, а поле осадков уменьшается с запада на восток. В летний период над территорией Юго-Восточного Крыма выпадает от 300 до 150 мм осадков, поле осадков уменьшается с северо-запада на юго-восток. И в зимний и в летний период наиболее засушливыми районами являются прибрежные участки террито-

рии Юго-Восточного Крыма (рисунок 2.7). Годовое распределение количества выпадающих осадков изменяется от 700 до 350 мм в направлении с запада на восток и с северо-запада на северо-восток.

Распределение полей климатических факторов влияет на формирование растительного покрова. В наиболее возвышенных участках территории Юго-Восточного Крыма преобладают наибольшее количество выпадающих осадков и малые температуры, в результате чего здесь развиты в основном грабовые и буковые леса. При уменьшении количества выпадающих осадков происходит постепенное вытеснение древесной растительности кустарниковыми и степными сообществами. Дубовые шибляки и типчаковые степи характерны для территорий, где выпадет наименьшее количество осадков.

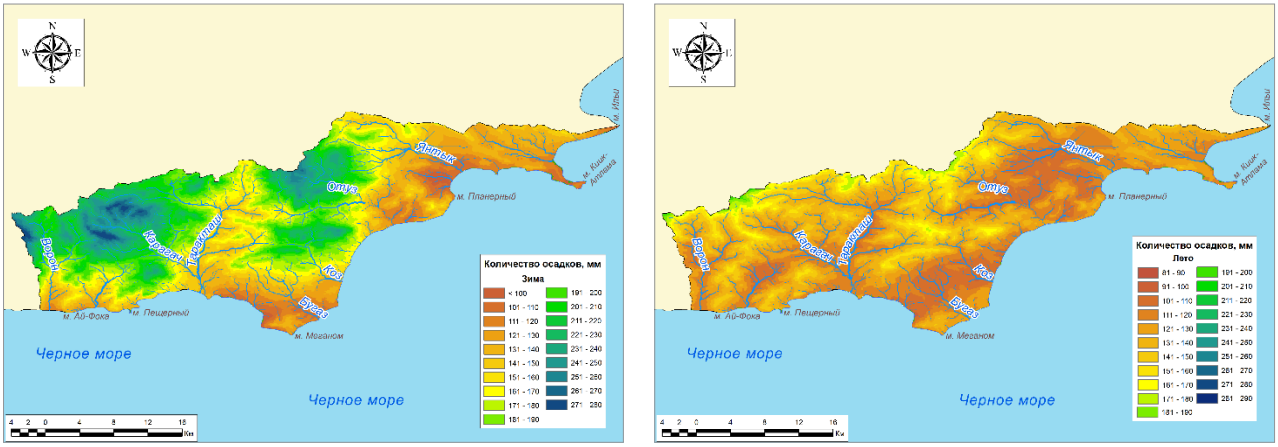


Рисунок 2.7. Среднемноголетнее количество осадков на территории Юго-Восточного Крыма за зимний (а) и летний (б) периоды, мм

В пределах территории Юго-Восточного Крыма, как и любой территории Северного полушария, распределение полей температуры во времени подвержено смене циркуляционных эпох и периодов. В Юго-Восточном Крыму наблюдаются существенные изменения среднегодовых значений поля температуры воздуха и количества выпадающих осадков (таблицы 2.1, 2.2).

Как видно из таблиц, наблюдается рост количества выпадающих осадков, а также минимальных, максимальных и средних температур воздуха, что создает предпосылки для увеличения испарения.

Большое влияние на пространственную дифференциацию растительности по склонам оказывает перенос снега. Данный процесс достаточно широко развит в условиях сильно расчлененного рельефа, где есть возможность формирования снегосборов. Перенос снега при метелях чаще всего имеет место при северо-восточных потоках воздуха. Это приводит к накоплению снега на склонах юго-западной экспозиции, формируя на них условия для развития древесно-кустарниковой растительности, тогда как склоны северных экспозиций характеризуются в большей степени степными сообществами (Боков, Горбунов, 2011).

Таблица 2.1. Годовое количество осадков в Юго-Восточном Крыму

Циркуляционные эпохи и периоды	Осадки. Год, мм				
	Минимум	Максимум	Амплитуда	Среднее	Стандартное отклонение
Зональная циркуляционная эпоха	350,2	819,3	469,1	544,1	93,8
1-й период меридиональной южной циркуляционной эпохи	386,2	828,6	442,4	566,1	85,3
2-й период меридиональной южной циркуляционной эпохи	331,7	838,6	506,9	513,9	82,8
3-й период меридиональной южной циркуляционной эпохи	381,9	817,1	435,2	542,7	74,4
4-й период меридиональной южной циркуляционной эпохи	431,8	871,0	439,2	589,9	81,2

Таблица 2.2. Среднегодовая температура воздуха в Юго-Восточном Крыму

Циркуляционные эпохи и периоды	Температура, °С				
	Минимум	Максимум	Амплитуда	Средняя	Стандартное отклонение
Зональная циркуляционная эпоха	7,9	11,7	3,8	10,5	0,8
1-й период меридиональной южной циркуляционной эпохи	8,4	12,1	3,7	10,9	0,8
2-й период меридиональной южной циркуляционной эпохи	8,3	12,0	3,7	10,8	0,8
3-й период меридиональной южной циркуляционной эпохи	8,2	12,0	3,8	10,8	0,8
4-й период меридиональной южной циркуляционной эпохи	9,1	12,9	3,8	11,7	0,8

2.4. Водные объекты

Густота речной сети в пределах Юго-Восточного Крыма уменьшается с юго-запада на северо-восток от 0,3 до 0,1 км/км^2 (Ресурсы поверхностных вод..., 1966). Косвенно этот показатель связан с увеличением засушливости климата и уменьшением количества выпадающих осадков. Водотоки Юго-Восточного Крыма полностью относятся к рекам южного макросклона Крымских гор. В таблице 2.3 представлены среднемноголетние характеристики годового стока рек Юго-Восточного Крыма, впадающих в Черное море.

Таблица 2.3. Среднемноголетние характеристики годового стока рек Юго-Восточного Крыма (Поверхностные водные объекты..., 2011; Тимченко, 2012) (Q – расход воды, м^3/с; W – объем стока, м^3; M – модуль стока, л/с км^2; h – слой стока, мм; C_v и C_S – характеристики изменчивости годового стока; ζ_Q – ошибка вычисления среднемноголетнего значения стока).

Река, гидропост	Площадь, км^2	Средняя высота, м	Период работы	Среднемноголетние значения						
				Q	W	M	h	C_v	C_S	ζ_Q
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ворон, с. Ворон	10,3	500	с 1964	0,028	0,881	2,72	85	1,11	1,95	20
Ай-Серез, с. Междуречье	12,8	480	с 1964	0,015	0,504	1,17	38	1,03	1,23	17
б. Скалистая, с. Междуречье	0,32		с 1985	0,001	0,032	3,12	100	0,64	1,19	16
Таракташ, г. Судак	156	340	с 1937	0,112	3,50	0,7	23	1,22	1,46	17
Отуз, пгт Щебетовка	58,0	340	с 1970	0,069	2,17	1,19	38	1,06	1,53	20
руч. Кизилташский, пгт Щебетовка	35,0	370	с 1971	0,037	1,16	1,05	33	1,30	2,35	24
руч. Кабакташский, пгт Щебетовка	22,0	330	1915–1970	0,02	0,62	0,91	28	1,32	1,41	18

О современном режиме рек позволяют судить семь гидропостов, расположенных на реках. В то же время речная сеть здесь довольно сложная, и в целом территория представляет собой сочетание речных долин, междуречий и водораздельных пространств (рисунок 2.2).

Стоит также отметить, что на побережье Юго-Восточного Крыма сформировались условия существования отдельных малых водосборов мелких балок и эрозионных форм в силу наличия сложного пересеченного рельефа, что создает уникальные топологические условия для существования растительных сообществ. Например, в пределах долин водотоков локальные факторы нарушают проявление квазизональных процессов – повсеместно встречаются помимо дубовых сообществ также сообщества из ольхи, тополя и ивы.

Территория Юго-Восточного Крыма активно подвержена селевым процессам (Олиферов, 2005). От посёлка Рыбачьего до Судака – сильной степенью селевой опасности, от г. Судака до пгт Курортного – сильной и средней степенью селевой опасности. В целом на территории преобладают проявления водно-мелкоглыбовых селей. Всё это вносит свой вклад в развитие лесных сообществ на рассматриваемой территории.

2.5. Почвы

Почвообразующими породами на большей части Юго-Восточного Крыма выступают сланцевый элювий, песчаники, конгломераты и галечники, а в районе горного массива Карадаг преобладает элювий вулканических пород (Почвенная карта УССР, 1966). В пределах Юго-Восточного Крыма представлены скелетные почвы, формирующиеся на продуктах выветривания пород таврической серии, известняков, мергелей, интрузивных и эффузивных пород. Территория крайне разнообразна по почвообразующим породам, а соответственно – по лесорастительным условиям.

Н. А. Драган (2003) на почвенной карте Крымского полуострова в пределах Юго-Восточного Крыма выделяет коричневые почвы сухих лесов и кустарниковых степей (вдоль побере-

жья Черного моря), дерновые карбонатные почвы и бурые горно-лесные почвы (в центральной части Юго-Восточного Крыма), чернозёмы слитые солонцеватые в комплексе с солонцами (в восточной части Юго-Восточного Крыма в районе города Феодосии).

Подробная характеристика почвенного покрова Юго-Восточного Крыма (масштаб 1:200000) приводится в (Почвенная карта УССР, 1966), однако в силу неизученности части территории почвенное картографирование для Юго-Восточного Крыма в (Почвенная карта УССР, 1966) выполнено не полностью. Согласно Почвенной карте УССР (1966), в пределах Юго-Восточного Крыма преобладают коричневые горные почвы сухих лесов и кустарников щебневатые на элювии и делювии коренных пород.

Современный этап почвенного картографирования выполнен для Юго-Восточного Крыма Е. Ю. Сухачевой, Я. С. Ревиной (2020) в рамках актуализации почвенной карты Южного берега Крыма. Хотя карта не покрывает всю территорию Юго-Восточного Крыма, можно наблюдать изменчивость почвенного покрова на большей части территории, к тому же достоинством этой работы является применение современной почвенной классификации и масштаб исследования 1:100000. По (Сухачева, Ревина, 2020), в пределах Юго-Восточного Крыма почвенный покров состоит из преобладающей сложной мозаики петроземов, литоземов и коричневых почв с выходами коренных скальных пород и территорий, покрытых осыпями и обвалами в нижней части южного макросклона Крымских гор и буроземов в комплексе с другими почвами в верхней части южного макросклона Крымских гор. В пределах речных долин и под сельскохозяйственными угодьями повсеместно представлены почвы обрабатываемых земель – различные агроабраземы.

Почвенный покров наряду с другими факторами внешней среды оказывает влияние на формирование растительных сообществ. Коричневые почвы в нижней части южного макросклона Крымских гор в основном приурочены к дубовым редколесьям с томиллярами и саванноидами или дубовым лесам из дуба пушистого или скального в классификации растительности по (Атлас. Автономна Республіка..., 2003) или шибляковыми сообществами и типчаковыми степями по классификации (Ландшафтно-геофизические условия..., 2001); бурые горно-лесные почвы в верхней части южного макросклона Крымских гор – к лесам из дуба пушистого и их производным в комплексе с грабинником или дуба скального в комплексе с грабом и ясенем. На различных вариантах черноземов в основном произрастают степные сообщества.

2.6. Растительный мир

В пределах Юго-Восточного Крыма сформировались уникальные растительные сообщества, которые несут в себе черты как лесного типа растительности, так и степного. К тому же пространственное распределение довольно неоднородно и возможны сочетания различных сообществ, в том числе лесных со степными.

В работе (Леса СССР, 1966) отмечается, что на Южном берегу Крыма от берега моря и до 400–500 м простирается пояс из зарослей дуба пушистого и можжевельников с участием вечнозеленых и листопадных средиземноморских растений, таких, как дикая фисташка, земляничное дерево, иглица, плющ и т. п.

М. А. Кочкин (1967) указывает на то, что в приморской части южного склона Главной гряды Крымских гор, в том числе и в Юго-Восточном Крыму, имеет преобладающее распространение дуб пушистый (*Quercuspubescens* Willd). Он произрастает здесь над уровнем моря на высоте от 20 до 450–500 м. Дуб пушистый – засухоустойчивый вид. Он распространен на территориях с количеством осадков 300–400 мм в год и на южных склонах, где выпадает 400–550 мм осадков, которые быстро испаряются, и ежегодно наблюдается летом засушливый период 2–3 месяца.

Н. И. Рубцов с соавторами (1966) указывают, что в Юго-Восточном Крыму преобладают растительные сообщества (шибляки) главным образом из дуба пушистого и грабинника, а

также дубовые леса. Согласно Я. П. Дидуху (1992), практически в пределах всего Юго-Восточного Крыма представлены леса из дуба пушистого, а в районе г. Феодосии – ковыльные настоящие степи предгорий. В работе (Дидух, 2003) приводится более подробная карта растительности Юго-Восточного Крыма. Большую часть территории в прибрежной части южного макросклона Крымских гор занимают редколесья из дуба пушистого в комплексе с томиллярами и саванноидами, а выше по склону – пушистодубовые леса с грабинником. В районе западнее г. Судака представлены можжевеловые леса, в районе Карадага – пушистодубовые леса. Западнее г. Феодосии представлены пушистодубовые леса и типичные разнотравно-ковыльные степи.

Ю. В. Плугатарь (2015) указывает, что на большей части территории Юго-Восточного Крыма преобладают дубовые леса и небольшие участки занимают сосновые и можжевеловые леса.

Л. Я. Гаркуша (2010) приводит карту растительного покрова Горного Крыма, которая практически полностью захватывает район исследования (за исключением крайней восточной части). Согласно (Гаркуша, 2010), растительный покров Юго-Восточного Крыма на западе включает дубовые, можжевелово-дубовые, дубово-фисташковые леса, расположенные вдоль побережья, а также шибляки в комплексе с участками типчаковой растительности степного и фриганоидного типа, с сельскохозяйственными угодьями на их месте. В центральной части Юго-Восточного Крыма встречаются сельскохозяйственные угодья на месте пушистодубовых лесов и ковыльно-типчаково-разнотравных степей. В районе массива Карадаг представлены дубово-грабинниковые леса с участием можжевельника и смешанные сложного состава шибляки с посадками сосны, фисташки и др. пород, а также пушистодубовые леса. В верхней части южного макросклона Крымских гор в пределах Юго-Восточного Крыма развиты скальнодубовые и дубово-грабовые леса.

Согласно (Ландшафтно-геофизические условия..., 2001), в пределах Юго-Восточного Крыма выделяется два высотных пояса растительности, поднимающихся от побережья Черного моря к главному водоразделу Крымских гор. Нижнюю часть склона занимают очень сухие шибляки и аридные редколесья, а далее располагаются очень сухие и сухие можжевелово-грабинниковые дубравы и субдубравы.

При анализе литературных источников можно отметить, что большинство авторов придерживается мнения, что в пределах Юго-Восточного Крыма преобладающими растительными сообществами являются заросли кустарников шиблякового типа, в основном состоящие из дуба пушистого, часто в сочетании с грабинником и саванноидными и фриганоидными сообществами, а также степные сообщества в районе города Феодосии и восточнее его.

Также стоит отметить, что часто в Юго-Восточном Крыму растительный покров коренным образом преобразован и растительность представлена либо культурными аграрными видами, либо проходит стадии дигрессии и замещения.

Тип растительного покрова напрямую влияет на водный баланс территории в силу пропускной способности растительности, способности удерживать и перераспределять влагу. Дополнительно на растительный и почвенный покров, а вместе с тем и распределение водного баланса оказывает воздействие животного мира. Для Юго-Восточного Крыма, к примеру, ярким примером этого является роющая деятельность кабана, которая имеет повсеместный характер и приводит к иссушению почвы, увеличивая испарение с ее поверхности. Этот фактор хорошо описан Л. П. Мироновой и Л. В. Знаменской (2023).

Таким образом, факторы и условия внешней среды способствуют пространственной дифференциации ландшафтов и оказывают непосредственное воздействие на пространственную дифференциацию лесов Юго-Восточного Крыма.

ГЛАВА 3

Материалы и методы исследования

3.1. Стационарные исследовательские площадки в различных типах лесных ландшафтов Юго-Восточного Крыма

В современной научной литературе особое внимание отводится использованию и непрерывному получению данных о состоянии окружающей природной и социально-экономической среды посредством их регистрации различными измерительными приборами и основанному на систематическом и непрерывном сборе данных. Использование разнообразных измерительных приборов, способных осуществлять непрерывную запись данных, дополняет этот процесс, делая исследование более полноценным и точным. Онлайн-мониторинг становится ключевым инструментом для получения данных в режиме реального времени. Этот метод позволяет исследователям непрерывно отслеживать изменения, происходящие в окружающей среде.

На территории Крымского полуострова мониторинговые ландшафтные исследования активно проводились в 60-е и 70-е гг. XX века (Ведь, 1971; Ведь, 1974; Ведь, 1978; Ведь, Федосеев, 1967; Кочкин, 1967; Климат и опасные..., 1982), однако затем их количество значительно уменьшилось, а после распада СССР они практически прекратились. Среди современных публикаций стоит отметить работы В. А. Бокова с соавторами (Ландшафтно-экологический стационар..., 1999; Ландшафтно-геофизические условия…, 2001; Трансформация ландшафтно-экологических процессов…, 2010), Т. В. Бобры (2005, 2007), Р. В. Горбунова с соавторами (2009, 2015), В. О. Смирнова (2009, 2012, 2016).

Основной целью 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. В рамках обозначенной цели решалась задача выбора ключевых участков в различных лесных сообществах Юго-Востоного Крыма для установки на них блока метеостанции с дополнительным набором датчиков.

3.1.1. Исследовательская площадка на восточном склоне хребта Беш-Таш

В пределах Карадагского заповедника функционирует Карадагский ландшафтно-экологический стационар (КЛЭС), включающий в себя территорию с типичными ландшафтами Юго-Восточного Крыма (рисунки 3.1, 3.2).

Выбор территории КЛЭС осуществлялся на основании научно-методических критериев, в том числе типичность ландшафтно-экологических условий для Юго-Восточного Крыма и соответствие нормам, принятым для полигонов в международной сети станций экологического мониторинга (Ландшафтно-экологический стационар..., 1999). Стационар расположен в пределах водосбора крупной балки (длина 0,6 км, площадь 17 га) на восточном склоне хребта Беш-Таш в 1,5 км от поселка городского типа Курортного.

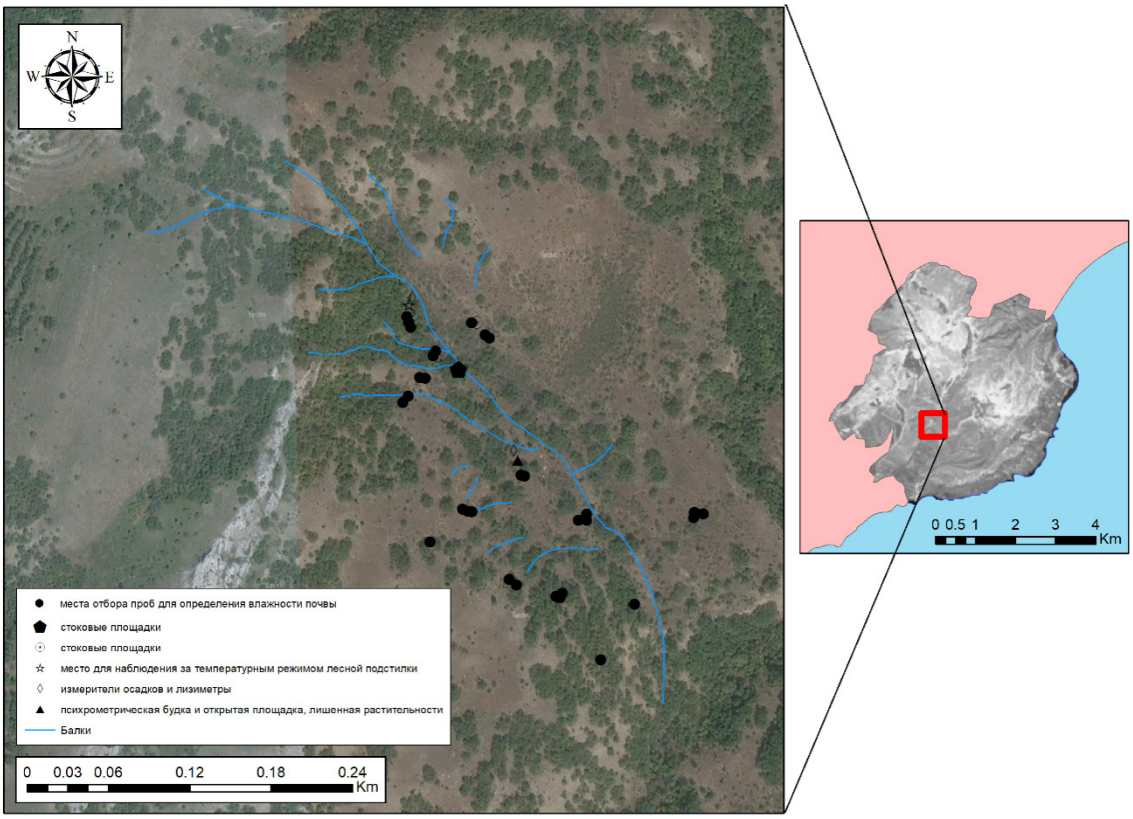


Рисунок 3.1. Территория КЛЭС

Рисунок 3.2. Территория КЛЭС (площадка для измерений)

На метеорологической площадке, расположенной на открытом участке в нижней части водосбора, измеряется количество выпавших осадков, влагозапас почвы. В средней части водосбора под пологом леса также установлены осадкоприемник и почвенные лизиметры. Наблюдения за влажностью почвы проводятся на 30 точках, расположенных на участках с лесной, кустарниковой и степной растительностью. Наблюдения за стоком проводится на двух стоковых площадках, заложенных в пределах стационара. Территория КЛЭС является репрезентативной для всего Карадагского природного заповедника, так как здесь представлены практически все типы растительных сообществ. Растительный покров характеризуется сильной мозаичностью, обусловленной в том числе расчлененностью рельефа. Более 20% территории занимают лесные сообщества. Они представлены в основном пушистодубовой формацией с добавлением формации клена полевого, формации фисташки туполистной, сосны крымской. Кустарниковые сообщества занимают примерно десятую часть стационара и представлены формациями колючих кустарников – держидерева, шиповника щитконосного, тёрна или сливы колючей, ежевики крымской. Травянистые сообщества довольно разнообразны и занимают более 60% территории стационара (Ландшафтно-геофизические условия..., 2001).

В рамках исследований на территории КЛЭС рассматривалась фация пушистодубового леса (рисунки 3.3, 3.4).

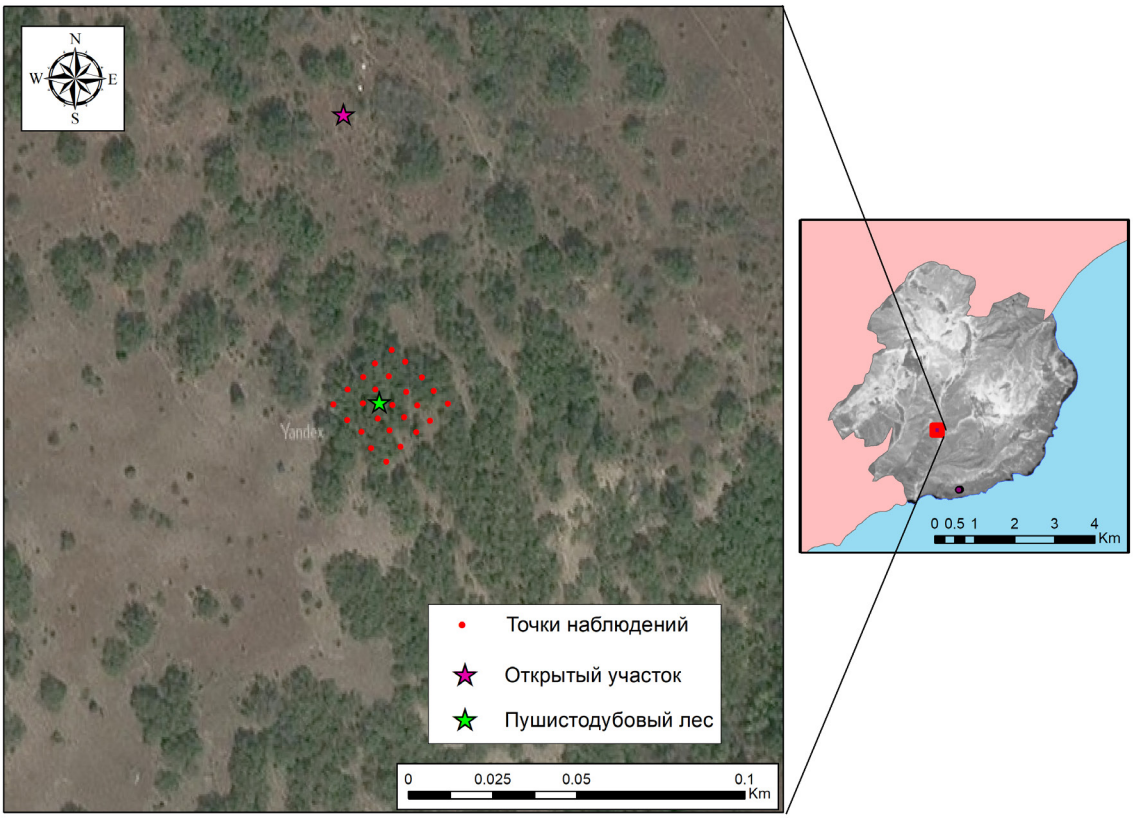


Рисунок 3.3. Расположение ключевого участка пушистодубового леса на территории КЛЭС

Рисунок 3.4. Фация пушистодубового леса в пределах территории КЛЭС

Она располагается на пологом склоне восточной экспозиции, представлена одним древесным ярусом дуба пушистого высотой в среднем 5 метров и диаметрами стволов 20 см и грабинника высотой 3,5 метра. Подрост молодых дубков высотой до 30 см встречается на всей исследуемой территории.

Кустарниковый ярус представлен скумпией кожевенной, кизилом обыкновенным и держидеревом. Травы представлены следующими видами: ясенец голостолбиковый, смолёвка густоцветковая, володушка Воронова, василёк козий, овсяница Калье.

Прилегающая степная фация представлена мезофитными травянистыми сообществами, среди которых дубровник обыкновенный, эгонихон пурпурно-голубой, гравилат городской и некоторые другие.

3.1.2. Исследовательская площадка на южном склоне хребта Карагач

В качестве второго рассматриваемого участка для наблюдений выступает можжевеловое сообщество, которое занимает крутой (до 45°) южный склон хребта Карагач и частично северный, выходя на гребень (рисунки 3.5, 3.6). В древесном ярусе здесь наряду с можжевельником высоким произрастают, местами доминируя, дуб пушистый и фисташка туполистная, а также каркас голый, ясень остроплодный, рябина греческая, клён полевой, держидерево, груша лохолистная.

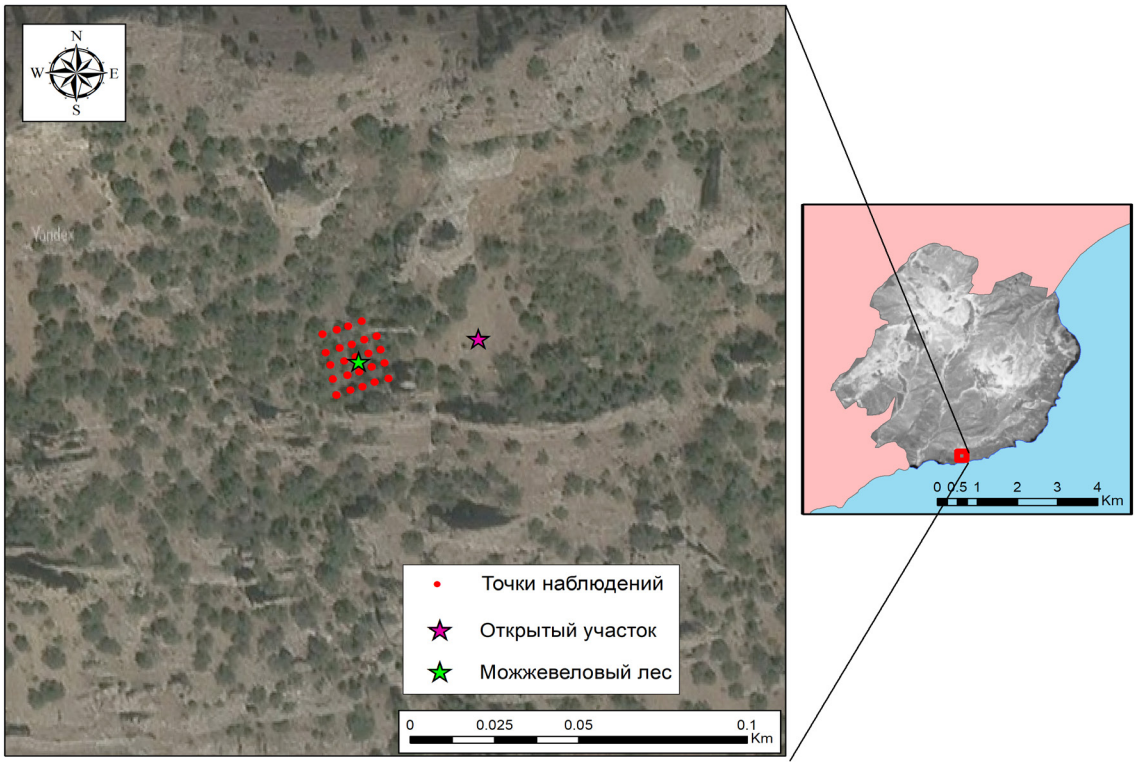


Рисунок 3.5. Исследовательская площадка на южном склоне хребта Карагач

Рисунок 3.6. Фация можжевеловых лесов на южном склоне хребта Карагач

3.1.3. Приборная база и её установка

Для обоих выбранных сообществ организованы площадки для измерения основных метеопараметров. Каждая площадка состоит из двух частей: открытый участок в зоне произрастания леса, обеспечивающий фиксацию значений, характерных для данной экосистемы без влияния древесной растительности, и типичный для сообщества участок леса, в котором идет дублирование ряда измерений с целью определения условий функционирования ландшафта и влияния растительности на распределение потоков вещества и энергии.

Для получения всех основных метеопараметров с промежутком в один час на открытом участке КЛЭС была установлена метеостанция фирмы DavisVantagePro2 (рисунок 3.7). Основной блок датчиков установлен на высоте 2 м, дополнительный датчик температуры и влажности воздуха на 0,5 м, анемометр – 7 м. Дополнительная станция на территории стационара позволила установить датчики температуры и влажности почвы на глубинах 0,05, 0,10, 0,15 и 0,20 м, а также датчики влажности листвы (рисунок 3.8). Датчики влажности листвы установлены на высоте травянистого покрова на открытом участке и под пологом деревьев, что позволило фиксировать степень и продолжительность увлажнения, выпадение росы и задержание осадков. Дополнительно проводились измерения температуры почвы с помощью дата-логгеров серии TR на глубине 0,1 и 0,2 м, а также температуры и влажности воздуха на высоте 0,5 и 2 м над поверхностью в подкроновом пространстве.

Рисунок 3.7. Метеостанция DavisVantagePro2 на территории КЛЭС

Рисунок 3.8. Процесс установки датчиков температуры и влажности почвы (слева) и датчика влажности листвы по уровню травянистой растительности (справа)

Аналогично пушистодубовому лесу на южном слоне хребта Карагач в зоне произрастания можжевелового леса установлена вторая метеостанция DavisVantagePro2, фиксирующая все основные метеорологические параметры (рисунок 3.9). В дополнение для измерения температуры почвы, температуры и влажности воздуха были установлены дата-логгеры серии TR в почве на глубине 0,1 м на открытом участке и под пологом леса, на высоте 0,5 и 2 м над поверхностью в подкроновом пространстве.

Детальное описание стационарных исследовательских площадок с последующим мониторингом предполагало использование БПЛА DJIP4 Multispectral, однако в связи со сложившейся небезопасной обстановкой проведение аэрофотосъёмки на территории Крымского полуострова запрещено.

Ограничение на использование БПЛА на территории Юго-Восточного Крыма установлено на основании Указа Главы Республики Крым после фактической даты начала реализации проекта РНФ. В частности, согласно Указу Главы Республики Крым от 24 февраля 2022 года № 32-У «Об угрозе чрезвычайной ситуации, возникшей на территории Республики Крым», в пункте 2-2 отмечается: «Ввести ограничения над всей территорией Республики Крым на полеты беспилотных воздушных судов, используемых физическими и юридическими лицами, за исключением беспилотных воздушных судов, используемых федеральными органами исполнительной власти, их территориальными органами, исполнительными органами Республики Крым». Таким образом, это повлекло невозможность в полном объеме выполнить запланированные полеты. Предоставленные первичные результаты были получены на основе проведенных ранее тестовых калибровочных полетов.

Рисунок 3.9. Метеостанция DavisVantagePro2 на открытом участке в зоне произрастания можжевелового леса

3.2. Подход к изучению низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов с использованием беспилотных летательных аппаратов

Экспедиционные и стационарные ландшафтные исследования традиционно проводятся в три этапа – подготовительный, полевой и заключительный (камеральный) (Геренчук и др., 1975). Однако там, где ландшафты занимают большие площади, использовать традиционные экспедиционные методы крайне проблематично. В большей мере это чрезвычайно актуально для горных регионов со сложным и расчлененным рельефом, покрытым труднопроходимой растительностью.

С момента зарождения ландшафтоведения как науки, в том числе при изучении морфологической структуры ландшафта и выполнении крупномасштабного ландшафтного картирования, использовалась аэрофотосъёмка с бортов самолетов. Этот вид деятельности существенно упрощал исследовательский процесс, но был довольно трудозатратным. Он использовался в основном на подготовительном этапе, и сейчас съемка с бортов самолетов практически не используется. Это связано с усовершенствованием методик исследования, а также практически полной ликвидацией парка малых воздушных судов (самолетов), используемых для научных целей.

Г. П. Миллер (1974) указывает, что полевая ландшафтная съемка горных и предгорных территорий выполняется прежде всего на ключевых участках, призванных стать эталонами морфологической структуры всей территории исследования. Это усложняет процесс выбора ключевого участка при работе с большими районами исследований и влияет на качество выполнения ландшафтной съемки.

С конца XX века в ландшафтоведении стали активно применять космические методы исследования. В. А. Николаев (1993) предлагает использовать космические методы для выделения ландшафтов и справедливо отмечает, что космические снимки подходят для среднемасштабных и крупномасштабных исследований. Несмотря на открытость источников спутниковых снимков и их относительно высокое пространственное разрешение, данный источник информации имеет ряд ограничений. В первую очередь это связано с орбитой и траекторией движения спутника, так как он проходит над определенной областью в конкретную дату, что диктует необходимость учитывать сезонность изучаемых параметров, не говоря о получении мгновенных данных. Также ограничивающим фактором выступает облачность, из-за которой возникает необходимость выборки качественных снимков. Пик использования космических снимков пришелся на начало XXI века и продолжается по сегодняшний день. Однако, как уже отмечалось выше, они не могут решить ряд крупномасштабных задач, стоящих перед исследователями.

К концу 2010-х гг. наметилась тенденция на широкое применение БПЛА в научных исследованиях (Garrett, Anderson, 2018). В первую очередь это связано с развитием технологий и широким внедрением БПЛА в производство. Во-вторых – с относительной ценовой доступностью. И в-третьих, с экономической эффективностью внедрения БПЛА. Ч. З. Нго с соавторами (2020) указывают, что применение БПЛА позволяет с высокой точностью исследовать относительно большие площади за незначительный период времени. В то же время эти достоинства привели к тому, что БПЛА всё чаще стали использовать в военной сфере (Дубинина, 2017; Мазулин, 2017) и для проведения различной противоправной деятельности (Каляев, Коровин, 2021). В связи с этим во многих государствах мира проводится политика регулирования рынка и использования БПЛА (Бужинский, 2014; Воздушный кодекс Российской Федерации, 2022).

Использование БПЛА позволяет отслеживать суточную динамику изучаемых процессов, вести оперативный мониторинг и получать мгновенные данные в режиме онлайн. В научных исследованиях для создания качественной съемки территории с использованием БПЛА хорошо себя зарекомендовала продукция фирмы DJI (Котлов и др., 2018; Кабонен, Ольхин, 2020). Используя БПЛА, можно добиться наиболее точных результатов по сравнению с другими методами дистанционного зондирования. Например, в (Нго и др., 2020) отмечается, что разрешение изображений БПЛА составляет 5 см/пиксель при съемке с высоты 200 м. Таким образом, съемка с БПЛА является более точной по сравнению с применением космических снимков высокого разрешения – Landsat (30 м/пиксель) и Sentinel-2 (10 м/пиксель), распространяемых по открытой лицензии. Безусловно, многие коммерческие продукты могут также похвастаться высоким пространственным разрешением менее 10 м/пиксель (Канопус-В, SPOT 6-7, WorldView-3, EROS B и пр.). Также, по сравнению со спутниковыми методами, помимо заявленного разрешения БПЛА, оператор устройства имеет возможность регулирования пространственного и спектрального разрешения за счет высоты работы прибора (Lan et al., 2020). Преимущества использования БПЛА по сравнению с космическими аппаратами широко обсуждаются и практически реализовываются в различных регионах мира (Iizuka et al., 2018; Riihimäki et al., 2019; Rasmussen et al., 2021). В то же время, в отличие от космических снимков, с использованием БПЛА можно получать мультиспектральные изображения сверхвысокого пространственного разрешения.

На квадрокоптере DJIPhantom 4 Pro в зависимости от поставленных задач в исследованиях используются данные, полученные с датчиков RGB (видимый спектр) и пяти монохромных датчиков [синий (blue, B): 450 нм ± 16 нм; зелёный (green, G): 560 нм ± 16 нм; красный (red, R): 650 нм ± 16 нм; красный край (rededge, RE): 730 нм ± 16 нм; ближний инфракрасный (near-infrared, NIR)): 840 нм ± 26 нм], для формирования мультиспектральных изображений.

Полученные в результате съемки БПЛА изображения обрабатываются с помощью программного обеспечения. Наиболее востребованными программными продуктами выступают

AgisoftMetashape и Pix4DMapper. Специализированные программы позволяют просмотреть отснятый материал, при необходимости отсеять часть данных и построить ряд картографических изображений. В результате обработки создается ортофотоплан местности, 3D модель поверхности изучаемой территории и, при использовании мультиспектральной камеры, карты вегетационных индексов. Самым распространенным является NDVI, используемый в качестве показателя количества фотосинтетически активной биомассы. Помимо наиболее часто используемых вегетационных индексов также существуют и узконаправленные, рассчитанные на решение определенных задач. Для их использования программным обеспечением предусмотрен калькулятор индексов, в котором задается формула необходимого вегетационного индекса и строится соответствующее изображение.

При анализе полученного изображения также используется метод классификаций, который позволяет распределить отснятые объекты по заданным категориям. Наиболее часто этот метод используется при мониторинге изменений наземного покрова, в частности распространения лесов, оползней, пожаров. Рядом ученых проводились исследования точности классификаций мультиспектральных и RGB датчиков, результаты классификаций сравнивались с данными полевых исследований. Согласно этим исследованиям, RGB камера продемонстрировала точность около 90%, а мультиспектральная – 95% (Furukawa et al., 2021). Отмечается, что ошибки классификации приходились в основном на затененные участки, а повышение точности достигается использованием расширенных алгоритмов анализа данных (Lan et al., 2020).

БПЛА активно применяются в научных исследованиях на заповедных территориях как на территории России, так и за рубежом. Тематике изучения структуры древостоя и его характеристик с помощью БПЛА посвящены работы Н. В. Ивановой с соавторами (2021a, 2021b), описывающие сосновые леса Приокско-Террасного биосферного заповедника, J. L. Gallardo-Salazar и M. Pompa-García (2020) о сосновых лесах Мексики и других. А. В. Остроухов с соавторами (2020) применяют БПЛА для целей ландшафтного картографирования труднодоступных территорий в государственном природном заповеднике «Болоньский». И. В. Чильчигешева (2020) исследует с применением БПЛА ландшафтные особенности островов Командорского архипелага. Широкое распространение применение БПЛА при изучении ландшафтов получило во Вьетнаме (Котлов и др., 2018; Нго и др., 2020). Здесь БПЛА на постоянной основе используются для картографирования лесных ландшафтов. Ч. З. Нго с соавторами (2020) использовали БПЛА для дешифрирования и картирования ландшафтов широколиственных и хвойных лесов заповедника Нгок Линь в провинции Кон Тум во Вьетнаме. И. П. Котлов с соавторами (2018) использовали БПЛА для составления ландшафтной карты ключевого участка в национальном парке Бидуп-Нуй Ба.

Б. И. Кочуров с соавторами (2021) применяют БПЛА для выделения древесной растительности при оценке зеленой инфраструктуры городских ландшафтов, а М. В. Покоева и А. М. Ярославцев (2020) – для комплексного экологического мониторинга состояния древостоя. БПЛА также активно применяют для принятия управленческих решений и мониторинга за лесными пожарами (Скуднева и др., 2020; Böhler et al., 2018), сельскохозяйственными угодьями (Кудрявцев и др., 2022; Iizuka et al., 2018; Gallardo-Salazar et al., 2020; Librán-Embid et al., 2020), оползневыми процессами (Librán-Embid et al., 2020), в исторических и археологических исследованиях (Böhler et al., 2018; Крупочкин и др., 2019). Помимо изучения ландшафтов и их элементов в ходе исследований уделяется большое внимание выбору типа камеры и способа обработки полученных первичных данных относительно каждой отдельной задачи (Gallardo-Salazar et al., 2020; Lan et al., 2020; Lu et al., 2020; Furukawa et al., 2021; Di Gennaro et al., 2022; Rouse et al., 2022).

При изучении радиационного и водного режима лесных ландшафтов огромное значение имеет влияние кронового рельефа на распределение потоков вещества и энергии. В свою очередь это является важнейшим аспектом при исследовании их структуры и функциониро-

вания. В лесу величина солнечной радиации, поступающей под полог леса, в большей степени определяется морфометрическими характеристиками кронового рельефа, который сильно дифференцирует значения солнечной радиации, поступающей на его поверхность (склоны кронового рельефа), и значения солнечной радиации, проходящей сквозь кроновое пространство, и в меньшей степени – характеристиками рельефа. Перераспределяясь в ландшафте, рассматриваемые потоки усложняют горизонтальную и вертикальную структуры экосистемы, создавая возможность или невозможность формирования большего количества ярусов и внутрифациальной структуры ландшафта (Петлін, 2007). При этом именно рельеф крон деревьев (крутизна и экспозиция) определяет количество солнечной радиации, которое поступает на верхнюю поверхность крон (верхнюю границу лесной экосистемы), и, соответственно, распределяется далее по ее вертикальным составляющим. Без использования БПЛА невозможно получить модель рельефа кронового пространства, которое определяет величину поступающей солнечной радиации на поверхность крон и под полог и, соответственно, все процессы в подкорковом пространстве. В результате использование беспилотных летательных аппаратов представляет собой единственный способ полноценного описания процессов функционирования лесных ландшафтов.

Таким образом, внедрение опыта и уже описанных методик использования БПЛА позволит добиться наиболее точных результатов при проведении исследований функционирования ландшафтов.

3.3. Методика расчета водного, радиационного и теплового балансов

3.3.1. Методика изучения радиационного баланса

С целью изучения радиационного балансабыли выбраны площадки для измерения основных метеопараметров: открытый участок в зоне произрастания леса, где происходит фиксация значений без влияния растительного покрова, и типичный для сообщества участок леса, на котором идет дублирование ряда измерений, что позволит проследить влияние растительности на распределение потоков вещества и энергии.

Исследования проводились на основе данных метеостанций DavisVantagePro2. Многолетние значения метеопараметров для заданного участка получены с помощью базы данных реанализа MERRA (Hernandez-Escobedo et al., 2022; MERRA-2 meteorologicalre-analysis, 2023). На их основе получено количество поступающей солнечной радиации и рассчитан радиационный баланс для сообщества в целом.

Измерения в лесных сообществах проводились в пределах типичных участков леса размерами 20х20 м по определенной регулярной сетке точек (рисунки 3.3, 3.5), расположенных через каждые 5 м. В каждой точке проводилось измерение пропускания солнечной радиации кронами деревьев с использованием цифрового измерителя освещенности DT-1309 на высоте 1 м над поверхностью почвы по методике В. О. Смирнова (2016).

В каждой точке были получены значения высоты деревьев и подроста, сомкнутости крон и степени освещенности. Полученные значения сопоставлялись с величиной освещенности на открытом участке и по соотношению вычислялась величина поступающей суммарной солнечной радиации под кроны деревьев на земную поверхность. В итоге рассчитывалось процентное соотношение пропускания солнечной радиации кронами пушистодубового и можжевелового лесов. Для описания временной изменчивости данного параметра измерения проводились в 9:00, 12:00, 15:00 и 17:00 часов в ясную безветренную погоду. Для более полного описания состояния крон деревьев и особенностей задержания ими поступающей радиации измерения проводились в летний период максимальной вегетации, при ясной безветренной погоде.

Для изучения температурного и влажностного режимов под пологом леса были установлены дата-логгеры серии TR, регистрирующие с периодичностью 1 раз в час температуру и влажность воздуха на высоте 0,5 м и 2 м над поверхностью почвы. Полученные данные позволили рассчитать величину эффективного излучения поверхности почвы – опада в пределах пушистодубового и можжевелового лесов.

Высота кронового рельефа получена с использованием квадрокоптера DJIP4Multispectral (рисунок 3.10).

Рисунок 3.10. Организация тестового полета с использованием квадрокоптера DJIP4Multispectral на открытом участке можжевелового леса

Отснятый материал обрабатывался с помощью программного обеспечения Pix4D, в котором создавался ортофотоплан, содержащий информацию о значениях высот кронового рельефа. Поверхность крон является достаточно неоднородной и сложной, поэтому предварительно была построена ее цифровая модель, которая позволила рассчитать крутизну и экспозицию склонов кронового рельефа в пушистодубовом и можжевеловом лесах, а также построить модель поступления суммарной солнечной радиации на поверхность крон при безоблачном небе. На основе данных рельефа кроны и географических координат района исследований моделируется распределение приходящей солнечной радиации с учетом положения и угла наклона солнца относительно поверхности и особенностей рельефа с помощью стандартного набора инструментов ArcGIS 10.

Расчет радиационного баланса (B) осуществлялся по формуле М. И. Будыко (1956):

$$B = (Q - R) - Ee, \quad (3.1)$$

где Q – суммарная солнечная радиация;
R – отраженная солнечная радиация;
Ee – эффективное излучение.

Отраженная радиация рассчитывалась по формуле:

$$R = A \cdot Q, \quad (3.2)$$

где A – альбедо земной поверхности.

Альбедо определялось по данным, приведенным в работе В. В. Рахманова (1984). Разность между суммарной и отраженной радиацией дает величину поглощенной коротковолновой радиации, или коротковолнового радиационного баланса.

Вычисления элементов длинноволновой части радиационного баланса проводились на основе данных, полученных с помощью дата-логгеров. Расчеты проводились на основе формулы D. Brunt (1932).

Использовались значения, взятые за период измерений степени пропускания солнечной радиации кронами. Так как измерения температуры и влажности проводились в одной типовой точке, то величины элементов длинноволновой части радиационного баланса рассчитаны как средние значения для участков пушистодубового и можжевелового лесов.

Эффективное излучение земной поверхности определялось по формуле:

$$Ee = Es - \delta Ea, \quad (3.3)$$

где Es – поток теплового излучения подстилающей поверхности, направленный в сторону атмосферы;

Ea – противоизлучение атмосферы;

δ – относительная излучательная способность поверхности.

Поток теплового излучения подстилающей поверхности, направленный в сторону атмосферы, определялся по формуле:

$$Es = \delta\sigma T4, \quad (3.4)$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана;

T – температура воздуха.

Противоизлучение атмосферы определялось по формуле D. Brunt (1932):

$$Ea = \delta\sigma T4\ ((1-a) + b\sqrt{e}), \quad (3.5)$$

где a и b – эмпирические константы согласно М. Е. Берлянд (a = 0,39; b = 0,058) (Берлянд, 1956);

e – парциальное давление водяного пара.

3.3.2. Методика изучения теплового баланса

Как и при изучении радиационного баланса, для изучения теплового баланса измерения и расчеты проводились для двух участков – открытого и лесного.

Измерение основных метеорологических параметров проводилось с помощью мониторинговой метеостанции DavisVantagePro2, установленной на открытом участке, фиксация значений проводилась ежечасно. На их основе получено количество поступающей солнечной радиации и рассчитаны основные элементы теплового баланса для сообщества в целом. Для проведения измерений под пологом леса были установлены дата-логгеры серии TR, регистрирующие температуру и влажность воздуха на высоте 0,5 м и 2 м над поверхностью почвы, а также под поверхностью на глубине 10 и 20 см. Таким образом, для корректного использования методики вычисления составляющих теплового баланса и сравнимости результатов на открытом участке и в лесу датчики измерения были установлены на тех же уровнях.

Для описания состояния крон деревьев и особенностей задержания ими поступающей радиации наши измерения проводились в зимний период (отсутствие листвы), весенний период (начало вегетации) и поздней весной (максимальное развитие кроны) при ясной безветренной погоде.

По заданной сетке измерений проводились измерения сомкнутости крон и степени пропускания солнечной радиации под кроны деревьев на земную поверхность. Затем полученные значения усреднялись для удобства проведения расчетов и описания сообщества в целом.

В основе представления об уравнении теплового баланса лежит закон сохранения энергии, применяемый для вертикальной колонны, захватывающей всю внешнюю географическую оболочку. Уравнение теплового баланса земной поверхности является суммой всех потоков тепла между поверхностью и окружающим пространством. Таким образом уравнение приобретает вид:

$$R = LE+P+B, \quad (3.6)$$

где R – радиационный баланс;

LE – затраты тепла на испарение (L – скрытая теплота испарения, E – скорость испарения или конденсации);

P – турбулентный поток тепла;

B – поток тепла в почве.

При этом величина R считается положительной, если она характеризует приход тепла к подстилающей поверхности, а все остальные величины – положительными, если они характеризуют расход тепла.

Методика расчета радиационного баланса (R) сформулирована М. И. Будыко (1956).

Для получения значения испарения в лесу использовалась формула (Будыко, 1956):

$$E = \frac{R-B}{L+Cp\frac{Q_1-Q_2}{q_1-q_2}}, \quad (3.7)$$

где E – испарение;

R – радиационный баланс;

B – поток тепла в почве;

L – скрытая теплота испарения;

Cp – теплоемкость воздуха при постоянном давлении (Физические свойства воздуха..., 2023);

$Q_1 – Q_2$ – разность температур на двух высотах;

$q_1 – q_2$ – разность удельных влажностей на двух высотах.

Расчет потока тепла в почве основан на использовании данных об изменении температуры почвы с глубиной и во времени при известных теплофизических характеристиках.

$$B = \frac{Cv}{\tau} S_1, \quad (3.8)$$

где C_V – объемная теплоемкость;

τ – продолжительность интервала (в минутах), для которого находится средний поток q_1;

S_1 – величина, характеризующая изменение температуры в верхнем 20-сантиметровом слое почвы за интервал τ.

Величина S_1 вычисляется по формуле:

$$S_1 = S_0+S_5+S_{10}+S_{15}+S_{20}, \quad (3.9)$$

где $S_0 = 20 \cdot 0{,}082\ \Delta t_0$;

$S_5 = 20 \cdot 0{,}333\ \Delta t_5$;

$S_{10} = 20 \cdot 0{,}175\ \Delta t_{10}$;

$S_{15} = 20 \cdot 0{,}156\ \Delta t_{15}$;
$S_{20} = 20 \cdot 0{,}004\ \Delta t_{20}$.

Величины Δt_0, Δt_5, Δt_{10}, Δt_{15} и Δt_{20} представляют собой разности между соответствующими значениями температуры почвы в последующий и предыдущий сроки наблюдений;

Δt_0 – аналогичная разность между температурой поверхности почвы в последующий и предыдущий периоды;

Δt5 – такая же разность температур на глубине 5 см и т. д.

Расчет объемной теплоемкости проводится методом С. В. Макарычева (2004):

$$C_{V0} = \frac{C_ж U_{пв} (p_0 - 0.76 p_ж) p_0}{0.76 p_ж}, \quad (3.10)$$

где $C_ж = 4190$ Дж/(кг К) – удельная теплоемкость воды;
$\rho_ж = 1000$ кг/м^3 – плотность воды;
ρ_0 – плотность абсолютно сухой почвы;
$U_{пв}$ – полная влагоемкость почвы.

$$U_{пв} = \frac{П}{p}, \quad (3.11)$$

где П – порозность почвы;
ρ – плотность почвы, г/см^3.

$$П = \frac{d - p}{d}, \quad (3.12)$$

где d – плотность твердой фазы почвы, г/см^3.

Объемная теплоемкость в срок наблюдений определяется по формуле:

$$C_V = C_{V0} + C_ж p_ж U, \quad (3.13)$$

где C_{V0} – объемная теплоемкость сухой почвы (Способ определения удельной..., 2003);
$C_ж \rho_ж U$ – теплоемкость содержащейся в почве жидкости;
U – влажность почвы.

Вычисление турбулентного потока тепла является сложной задачей, поэтому чаще всего в климатологических расчетах турбулентного теплообмена для условий суши его величины определяются из решения уравнения теплового баланса. Наиболее простой путь при этом заключается в определении теплообмена как остаточного члена баланса, т. е. по формуле:

$$P = R - LE - B. \quad (3.14)$$

3.3.3. Методика изучения водного баланса

В классическом виде уравнение водного баланса (Михайлов и др., 2007) может быть представлено в следующем виде (рисунок 3.11):

$$x + y_1 + w_1 + z_1 = y_2 + w_2 + z_2 \pm \Delta u, \quad (3.15)$$

где x – атмосферные осадки на поверхность объекта;
y_1 – поверхностный приток воды извне;
w_1 – подземный приток воды извне;
z_1 – конденсация водяного пара;

y_2 – поверхностный отток воды за пределы объекта;
w_2 – подземный отток воды за пределы объекта;
z_2 – испарение;
Δu – изменение объема воды в пределах объекта (контура).

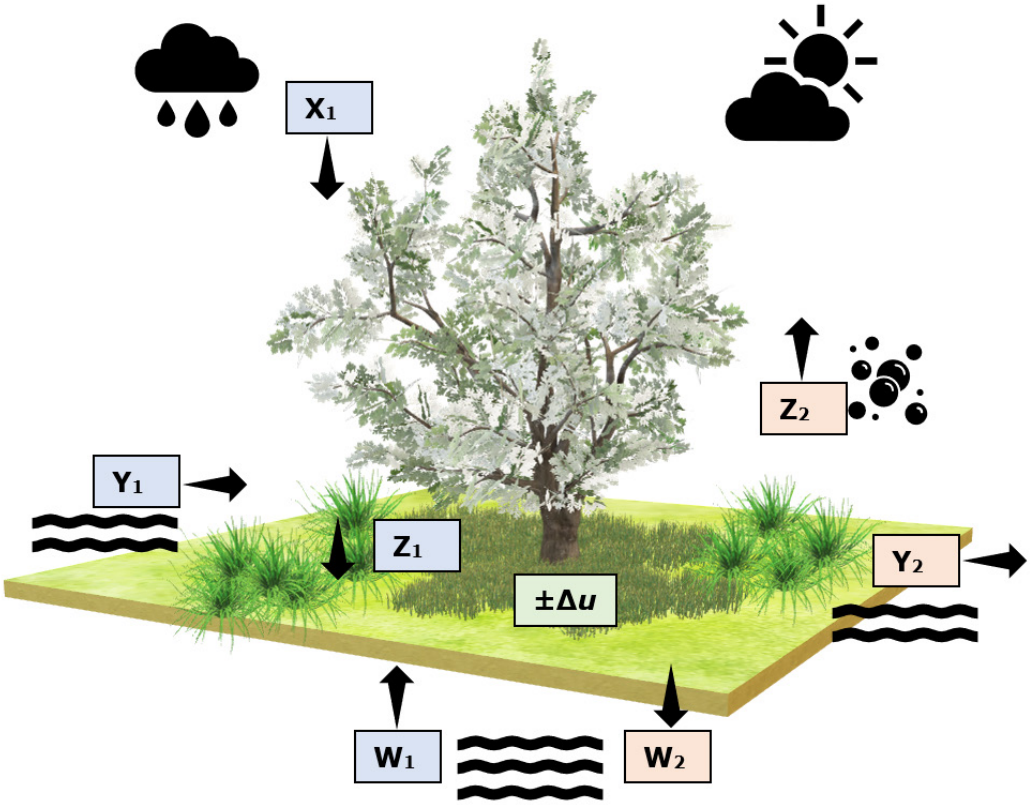


Рисунок 3.11. Схема визуализации уравнения водного баланса

На локальном уровне исследования структура водного баланса представляет собой еще более сложное явление. Структура водного баланса лесов состоит из нескольких элементов: поступление воды с атмосферными осадками и поверхностным стоком с соседних участков, задержание воды кронами деревьев, сток воды по веткам и стволу деревьев, транспирация и испарение с кроны деревьев, поступление воды на поверхность лесного опада, испарение с поверхности лесного опада, поступление воды в почву, испарение воды из почвы, ее задержание опадом (формирование влагоемкости почвы и опада), поверхностный сток, внутрипочвенный сток, переход воды в подземный сток.

Многолетние данные о количестве и интенсивности атмосферных осадков, влагозапасах в почве, поверхностном стоке на территории КЛЭС были получены из Летописей природы Карадагского заповедника.

Для получения значений и построения карт эвапотранспирации были использованы данные открытой базы данных реанализа ERA5 проекта CopernicusClimateChangeService, реализуемого Европейским центром среднесрочных погодных прогнозов (ECMWF) (MERRA-2 meteorologicalre-analysis..., 2023). В результате были получены усредненные месячные данные за 1978–2021 гг. Они представлены в формате NetCDF4 и покрывают рассматриваемую территорию регулярной сеткой с размером ячейки 0,25°× 0,25°.

Помимо использования данных реанализа проводились стационарные и полустационарные исследования. На выбранных ключевых участках пушистодубового и можжевелового лесов с помощью установленной метеостанции были получены данные о ежечасном количестве осадков, их интенсивности, а также расчетное значение эвапотранспирации. Данный показатель рассчитывается самой метеостанцией на основе температуры воздуха, влажности,

средней скорости ветра и солнечного излучения, но не происходит учет конденсации. Кроме того, в зоне пушистодубового леса установлен комплекс дополнительных датчиков влажности почвы на разных глубинах и датчики влажности листвы.

Датчики влажности почвы измеряют электрическую проводимость, и в результате уровень влажности фиксируется в сантибарах. Затем значения переводились в проценты, однако после определенного порога низкая влажность почвы интерпретируется как «0». С точки зрения растительности данное значение обозначает отсутствие доступной для впитывания влаги.

Датчик влажности листвы представляет собой имитацию листовой пластины, на которой конденсируется влага. В зависимости от степени покрытия поверхности листа влагой получаемые значения варьируются от 0 (абсолютно сухая поверхность) до 15 (максимальное увлажнение).

В условиях можжевелового леса измерения влажности почвы проводились ежемесячно-весовым методом.

3.4. Методика оценки факторной энтропии ландшафтов

В настоящее время в рамках системной парадигмы любой объект можно представить как набор элементов, объединённых энергоинформационными связями. Их анализ позволяет выявить свойства, характеризующие функционирование системы во времени и пространстве. Одним из них является энтропия, в классическом определении характеризующая меру необратимого рассеивания энергии.

Понятие «энтропия» фигурирует в научном обществе ещё с XIX века и к настоящему времени сменило ряд различных трактовок и областей применения. Ознакомившись со множеством вариантов интерпретации этого явления, можно обозначить его как меру необратимого рассеивания энергии (классическое определение), меру отклонения от равновесия, меру хаотичности, меру вероятности. В экологии это понятие часто используется как синоним меры биологического разнообразия. Также понятие «энтропия» можно использовать и для описания ландшафта.

Для лучшего понимания смысла и причины возникновения этого понятия необходимо обратиться к истокам его формирования. По мере развития представления об энтропии видоизменялось и определение данного термина. Первоначально понятие «энтропия» зародилось в физике, затем распространилось в химию, биологию, географию, теорию информации и даже космологию.

Клод Шеннон представил энтропию как меру случайности (Шеннон, 1963). В его определении «*это количество информации, приходящейся на одно элементарное сообщение источника, вырабатывающего статистически независимые сообщения*». В этой сфере энтропия показывает, что количество равновероятных состояний системы обусловливает количество информации, необходимое для снятия неопределённости о ней.

Согласно Концепции, принятой в г. Рио-де-Жанейро, биологическое разнообразие означает *«вариабельность живых организмов из всех источников, включая, среди прочего, наземные, морские и иные водные экосистемы и экологические комплексы, частью которых они являются; это понятие включает в себя разнообразие в рамках вида, между видами и разнообразие экосистем»* (Конвенция о биологическом..., 2023). В современной биологии понятие «энтропия» используется для оценки видового разнообразия, устойчивости, старения (накопления энтропии) и т. д.

В настоящее время формула Шеннона наиболее часто применяется для оценки ландшафтного разнообразия. В работе О. Н. Барышниковой «Информационные свойства ландшафтных геосистем и возможности их исследования» (2009) энтропия отождествляется с информационной составляющей ландшафта, а главное информационное воздействие на гео-

системы оказывает земная гравитация. Отмечено, что эта сила обусловливает формирование рисунка ландшафта, вертикальную стратификацию, метрические свойства земных тел и, таким образом, определяет разнообразие природной среды. О. Н. Барышникова с соавторами (2009) дают количественную оценку разнообразия ландшафта посредством вычисления энтропии и отмечают, что максимальные показатели приходятся на переходные зоны (экотоны) и контакты геологических структур. При удалении от данных зон происходит снижение энтропии. Кроме того, в работе отмечается тенденция к снижению энтропии геосистем по мере продвижения сверху вниз до определённого иерархического уровня. В качестве факторов, определяющих величину ландшафтного разнообразия, представлены: климат, размер массива, особенности рельефа и геологии, характер растительности, гидроморфизм территории. Поступление и трансформация солнечной энергии обуславливают ландшафтное разнообразие на планетарном уровне. Таким образом, увеличение энтропии – показатель эволюции и развития любой системы.

Разнообразие значений факторов вычислялось посредством применения формулы Шеннона:

$$E(A) = -\sum \frac{f_i}{\sum f_i} \log_2 \frac{f_i}{\sum f_i}, \tag{3.16}$$

где *fi* – количество точек заданного класса значений;
∑*fi* – количество точек в контуре.

С целью приведения значений энтропии к относительным величинам была рассчитана относительная энтропия:

$$E = E(A)/n, \tag{3.17}$$

где n – количество выбранных классов.

3.5. Методика изучения ландшафтных стратегий в условиях климатических изменений

Изменение растительного покрова является одним из ведущих показателей реакции экосистемы на изменение факторов и условий внешней среды (Miles, 1979; Zhou et al., 2020). В последние годы, изменение растительности на планете носит глобальный характер (Piao et al., 2005; Mayeux et al., 2021) и представляет существенную угрозу. В решении вопроса о резком сокращении растительного покрова заинтересованы все страны, что находит отражение в различных нормативных документах во всех странах мира (Brancalion et al., 2016; Opoku, 2019).

Огромное влияние на изменение растительного покрова оказывают климатические факторы (Li et al., 2015; Jiang et al., 2017; Kalisa et al., 2019; Verrall, Pickering, 2020), а также антропогенное воздействие, связанное как с комплексными процессами, так и с целенаправленным сведением растительного покрова для различных хозяйственных целей (Eddy et al., 2021; Feng et al., 2021; Wang et al., 2022). Особенно остро проблема вырубки растительности стоит в крупных государствах, обладающих запасами древесины, – Бразилии, Канаде, Китае, России и др. Изменение растительности оценивается различными способами – с применением компьютерного моделирования, с использованием методов дистанционного зондирования (Hobbs, 1990; Yurova et al., 2011; Sun et al., 2022), через изменение соотношения типов наземного покрова (Abdullah et al., 2019; Potapov et al., 2020; Liu et al., 2021), изменение характеристик вегетационных индексов (Gandhi et al., 2015; Waseem, Khayyam, 2019; Kang et al., 2021), при применении различных классификаций мультиспектральных космических снимков (Jełowicki et al., 2020; Keshta et al., 2022).

В то же время использование данных дистанционного зондирования позволяет практически в режиме реального времени изучать изменение растительного покрова, в том числе и его качественные характеристики. В последние годы для оценки изменения растительности всё чаще применяется анализ динамики значений вегетационного индекса NDVI (Gandhi et al., 2015; Li et al., 2023; Long et al., 2023). Это объясняется в первую очередь простотой расчета NDVI и большим накопленным объемом мультиспектральных космических снимков высокого разрешения, которые необходимы для расчета NDVI. Среди наборов космических снимков можно отметить MODIS, Landsat, Sentinel и ряд других, которые имеют как достоинства, так и недостатки, однако активно применяются при изучении растительного покрова в различных регионах мира. Традиционно использование вегетационного индекса NDVI находит применение в сельском хозяйстве (Dhillon et al., 2023) для анализа состояния посевов и расчета норм проведения различных мелиорационных работ. Использование вегетационного индекса NDVI в последние годы активно применяется для оценки изменения растительности в Китае (Tong et al., 2018; Han et al., 2022; Jiang et al., 2022; Li et al., 2022), Индии (Saikia, 2009; Kamble et al., 2010), США (Johnson et al., 2021), Бангладеш (Abdullah et al., 2019), Аргентине (Long et al., 2023), Иране (Ghorbanian et al., 2022), Пакистане (Waseem, Khayyam, 2019) и других странах.

3.5.1. Данные

3.5.1.1. Растительность Юго-Восточного Крыма

В качестве исходных данных о растительном покрове в пределах Юго-Восточного Крыма использована карта растительности (рисунок 3.12), представленная в работе (National Atlas of Ukraine, 2007).

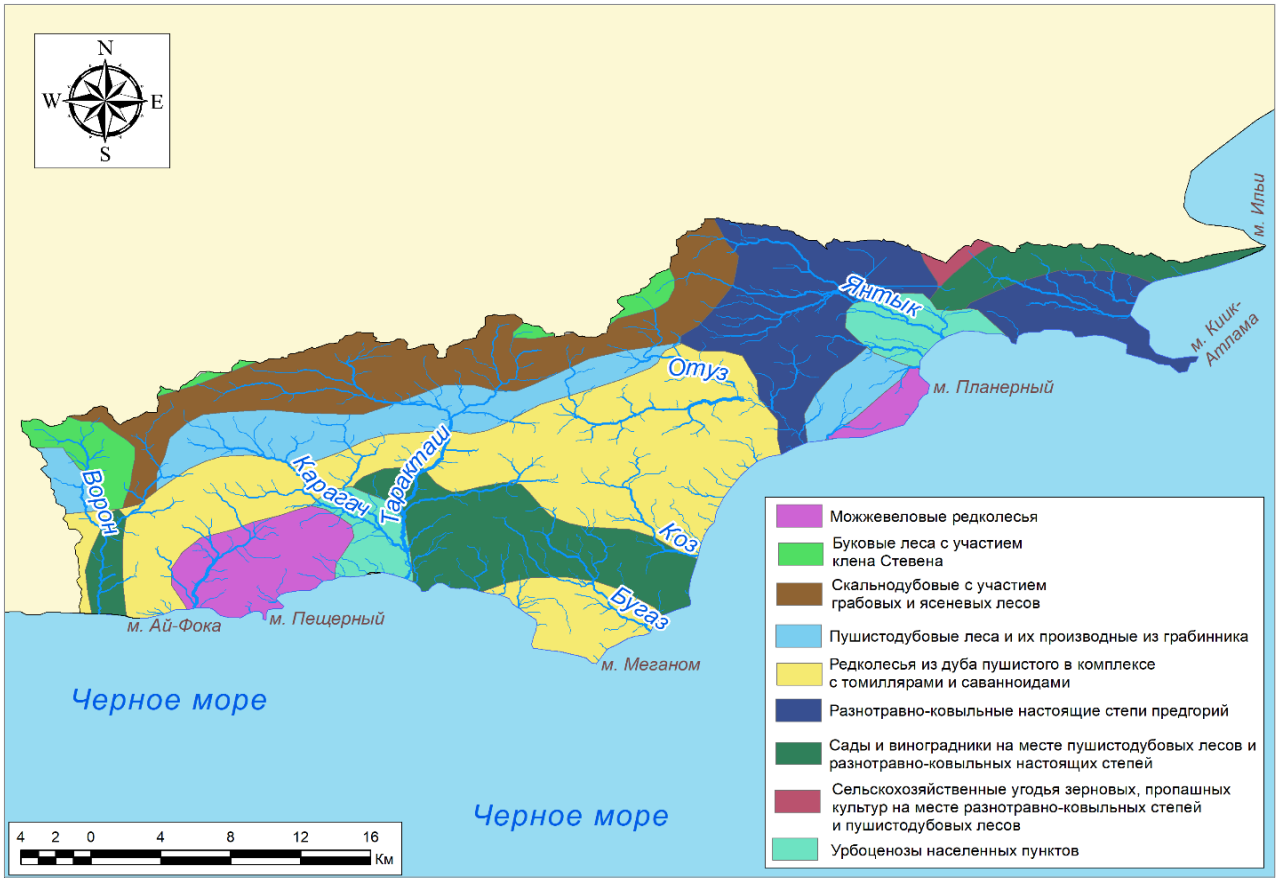


Рисунок 3.12. Растительность Юго-Восточного Крыма [по (National Atlas of Ukraine, 2007)]

В исследуемом регионе пространственное распределение растительности подвержено влиянию высотной поясности, которая не представляет собой цельные полосы и нарушается рядом местных локальных орографических факторов. С уменьшением абсолютных высот с севера на юг последовательно сменяются – буковые леса с примесью клёна Стевена, скальнодубовые леса с примесью грабовых и ясеневых лесов, пушистодубовые леса, редколесья из дуба пушистого в комплексе с томиллярами и саванноидами, разнотравно-ковыльные настоящие степи. В наиболее равнинных участках и нижней части, примыкающей к морю, в Юго-Восточном Крыму расположены сельскохозяйственные земли, занятые садами, виноградниками и возделываемыми полями. Вдоль побережья встречаются можжевеловые леса. Повсеместно представлены урбоценозы населенных пунктов. Распределение площадей основных типов растительности в пределах Юго-Восточного Крыма представлено в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Основные типы растительного покрова в Юго-Восточном Крыму

Типы растительного покрова	**Площадь, кв. км**
Можжевеловые редколесья	38,42
Буковые леса с участием клёна Стевена	18,11
Скальнодубовые с участием грабовых и ясеневых лесов	80,54
Пушистодубовые леса и их производные из грабинника	61,28
Редколесья из дуба пушистого в комплексе с томиллярами и саванноидами	169,03
Разнотравно-ковыльные настоящие степи предгорий	85,39
Сады и виноградники на месте пушистодубовых лесов и разнотравно-ковыльных настоящих степей	84,31
Сельскохозяйственные угодья зерновых, пропашных культур на месте разнотравно-ковыльных степей и пушистодубовых лесов	2,58

3.5.1.2. Космические снимки

В работе использованы космические снимки MODIS за 2001–2022 гг. Использование изображений MODIS (с разрешением 500 метров/пиксель, составленных из 8-дневных композитов) в первую очередь обусловлено их более широким временным охватом, включая получение облачных и малооблачных снимков в районе исследования по сравнению с конкурентами, такими как Landsat (с разрешением 30 метров/пиксель) и Sentinel-2 (с разрешением 10 метров/пиксель), которые могут предоставлять более высокое пространственное разрешение. MODIS имеет более высокую периодичность наблюдения за территорией и акваторией в районе исследования. Обработка и вычисления значений вегетационного индекса NDVI по космическим снимкам MODIS производились с использованием платформы облачных вычислений GoogleEarthEngine (GEE).

3.5.1.3. Температура, осадки и радиация

В последние годы активно анализируются различные базы данных о метеорологических параметрах (Belay et al., 2019; Banerjee et al., 2020).

Данные о пространственном и временном распределении полей температуры воздуха, количества выпадающих осадков и солнечной радиации получены из открытых баз данных и опубликованных работ авторов (Fedorov et al., 2017; Gorbunov et al., 2020). Данные о температуре воздуха в пределах территории Юго-Восточного Крыма получены из базы данных

ClimateEU (Marchi et al., 2020). Данные о количестве выпадающих осадков и солнечной радиации получены с использованием платформы облачных вычислений GEE – из наборов данных CHIRPS (Funk et al., 2015) и ERA5-Land (Muñoz Sabater, 2023).

3.5.2. Методика исследования

3.5.2.1. Анализ изменения трендов NDVI

Изменение трендов значений NDVI в пределах Юго-Восточного Крыма анализируется для всей исследуемой территории и для каждой ячейки растра значений NDVI. Для оценки изменения трендов активно применяется модель линейной регрессии (Sun et al., 2019; Jiang et al., 2021; Han et al., 2022; Jiang et al., 2022). Оценка изменений значений NDVI со временем производится по формуле:

$$Slope = \frac{n*NDVI_i*\sum_{i=1}^{n} i-\sum_{i=1}^{n} i*\sum_{i=1}^{n} i}{n*\sum_{i=1}^{n} i^2-(\sum_{i=1}^{n} i)^2}, \quad (3.18)$$

где i – год;
n – количество лет наблюдения за изучаемым явлением;
$NDVI_i$ – значение NDVI за i год.

Отрицательные значения наклона NDVI указывают на то, что со временем значения NDVI уменьшаются, а положительные значения наклона NDVI – на то, что со временем значения NDVI увеличиваются. Дополнительно в программном комплексе R Studio проводилась оценка p-уровней значимости.

3.5.2.2. Коэффициент вариации

Для оценки стабильности изменения значений NDVI за период с 2001 по 2022 гг. в Юго-Восточном Крыму был рассчитан коэффициент вариации. Расчет коэффициента вариации производился по формуле:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(NDVI_i-NDVI)^2}}{NDVI}, \quad (3.19)$$

где CV – коэффициент вариации;
n – количество лет в исследуемом периоде;
$NDVI_i$ – значение NDVI в год i;
$NDVI$ – среднее значение NDVI за изучаемый период (Jiang et al., 2022).

Оценка коэффициента вариации проводилась с использованием программного комплекса R Studio для каждого пикселя растра в пределах исследуемого региона. Данные о значениях из растра получены с использованием программного комплекса QuantumGIS. В качестве меры стабильности изменений значения коэффициента вариации разделены на четыре класса, согласно (Han et al., 2022) – очень стабильный (CV ≤ 0,04), стабильный (0,04 < CV ≤ 0,08), незначительно измененный (0,08 < CV ≤ 0,12) и сильно измененный (CV > 0,12) для каждого пикселя изучаемого изображения.

3.5.2.3. Индекс Херста

Для оценки стратегий развития лесных экосистем был рассчитан индекс Херста, который дает возможность прогнозирования тенденции эволюции изменения временных рядов, и это эффективный метод выявления долгосрочной зависимости временных рядов. Подробное

описание использования и расчетов индекса Херста показано во многих работах (Kang et al., 2021; Han et al., 2022; Jiang et al., 2022). Для упрощения расчетов, оценка индекса Херста проводилась с использованием программного комплекса R Studio для каждого пикселя растра в пределах исследуемого региона. Значения данных были получены из растра с использованием программного пакета QuantumGIS. Для расчета индекса Херста использовались данные из 8-дневных периодов измерений космического спутника MODIS. Расчет индекса Херста проводился с использованием среды программирования R Studio и библиотеки «pracma». Этот метод включает в себя вычисление индекса Херста с помощью анализа R/S.

Для выполнения анализа R/S временные ряды, охватывающие период с 2001 по 2022 год, были индивидуально подвергнуты обширному исследованию на предмет стационарности или нестационарности. Эта оценка проводилась для каждой пространственной ячейки. Для этой цели использовался тест Дики-Фуллера, доступный в среде R Studio и с помощью библиотеки «tseries». В случаях, когда были обнаружены нестационарные временные ряды, применялась последовательность преобразований, чтобы сделать их стационарными. Программа R Studio использовалась для этого процесса с применением таких методов, как логарифмирование и дифференцирование. После достижения стационарных временных рядов производился расчет индекса Херста с использованием библиотеки «pracma» в среде R Studio. Этот индекс вычисляется на основе анализа R/S и служит показателем долгосрочной зависимости или устойчивости в данных. Рассчитанные значения индекса Херста предоставляют информацию об основной временной динамике анализируемых переменных в различных пространственных ячейках. Следует отметить, что этот методологический подход соответствует комплексному рабочему процессу, включающему предварительную обработку данных, статистический анализ и вычислительные процедуры, все проводимые в среде R Studio. Значение индекса Херста играет важную роль в определении будущей тенденции NDVI.

3.5.2.4. Корреляционный анализ

Для оценки воздействия климатических факторов (среднегодового количества выпадающих осадков, среднегодовых температур воздуха и среднегодового количества поступления солнечной радиации) был проведен корреляционный анализ между климатическими факторами и среднегодовыми значениями NDVI в пределах Юго-Восточного Крыма. Корреляционный анализ активно применяется при исследовании взаимосвязей между климатическими факторами и значением NDVI в различных исследуемых регионах мира (Fan et al., 2020; Jiang et al., 2022; Wang et al., 2023). Оценка корреляции проводилась с использованием программного комплекса R Studio. Данные о среднегодовых значениях NDVI, температуры воздуха, количества выпадающих осадков и поступлении солнечной радиации были получены для сетки точек с использованием программного комплекса QuantumGIS (набор инструментов Vector-RasterSAGA). Каждая точка в представленной сетке точек служит центральной точкой для квадрата размером 500 на 500 метров. Следовательно, эти точки равномерно разделены друг от друга на расстояние 500 метров. Расчет корреляции произведен по формуле:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}[(x_i - x)(y_i - y)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - x)^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - y)}}, \quad (3.20)$$

где R_{xy} – коэффициент корреляции;

n – количество лет в исследуемом периоде;

x и y – факторы, используемые для корреляционного анализа, соответственно представляющие выборочные средние значения переменных (Sun et al., 2019).

Проведение корреляционного анализа было выполнено с использованием программного пакета R Studio. Для целей анализа корреляции временные ряды данных NDVI и климатические данные, охватывающие период с 2001 по 2022 год, были тщательно проанализированы с точки зрения их стационарности или нестационарности. Это исследование проводилось при помощи статистического теста Дики-Фуллера в среде программирования R Studio с использованием библиотеки «tseries». Временные ряды, выявившие нестационарность, подверглись процессу преобразования в стационарные ряды с использованием методов логарифмирования и дифференцирования. Эти методы были применены с целью выравнивания дисперсии во временной плоскости и удаления трендов. После получения стационарных временных рядов были вычислены коэффициенты корреляции для каждой временной точки данных. Этот шаг имеет важное значение для выявления связей между NDVI и климатическими переменными. Затем сгенерированные наборы данных о корреляции были внедрены в программный пакет ArcGIS. В этой геопространственной среде была выполнена процедура интерполяции, используя широко известный метод «Spline». Эта операция интерполяции позволила получить промежуточные значения между дискретными точками данных. Далее были созданы картографические представления для визуализации пространственных закономерностей, выявленных на основе интерполированных данных, что дало ценные представления о динамике изучаемых переменных в пределах географической области.

ГЛАВА 4

Результаты исследований элементов радиационного, теплового и водного балансов различных типов низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов

4.1. Радиационный баланс

4.1.1. Радиационный баланс в пределах открытого участка

При рассмотрении радиационного баланса открытого участка можно проследить основные тенденции его изменения во внутригодовой и межгодовой динамике.

При рассмотрении данных за последние 10 лет наблюдаются значительные колебания значений годового баланса с минимумом в 2021 г. (855 МДж/м^2) и максимумом в 2017 г. (1126 МДж/м^2). Таким образом, амплитуда значений годового радиационного баланса достигает 271 МДж/м^2 (рисунок 4.1). При этом линия тренда характеризуется ростом среднего многолетнего значения радиационного баланса, хотя в последние годы наблюдается снижение рассматриваемого показателя.

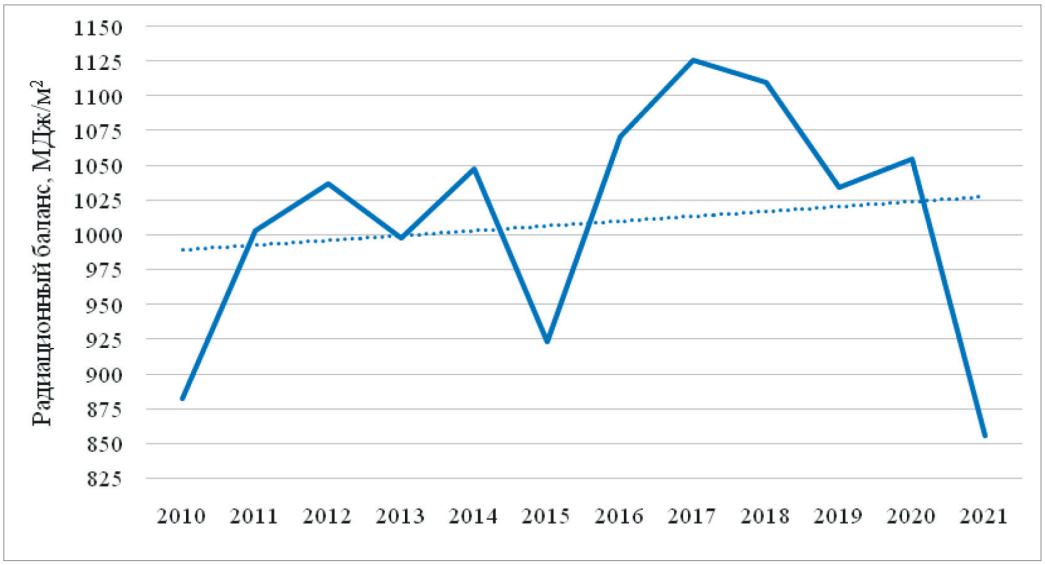


Рисунок 4.1. Величины годового радиационного баланса территории КЛЭС, МДж/м^2

При рассмотрении внутригодовой динамики закономерно выделяются два периода (рисунок 4.2): положительный баланс в летний период (с марта по октябрь) и отрицательный в зимний (с ноября по февраль). Наименьшее значение наблюдается в декабре и составляет –176,3 МДж/м^2, а максимальное – в июле и составляет 341,8 МДж/м^2. Переход от наименьшего значения к наибольшему и обратно происходит циклично, при смене сезонов года без резких колебаний.

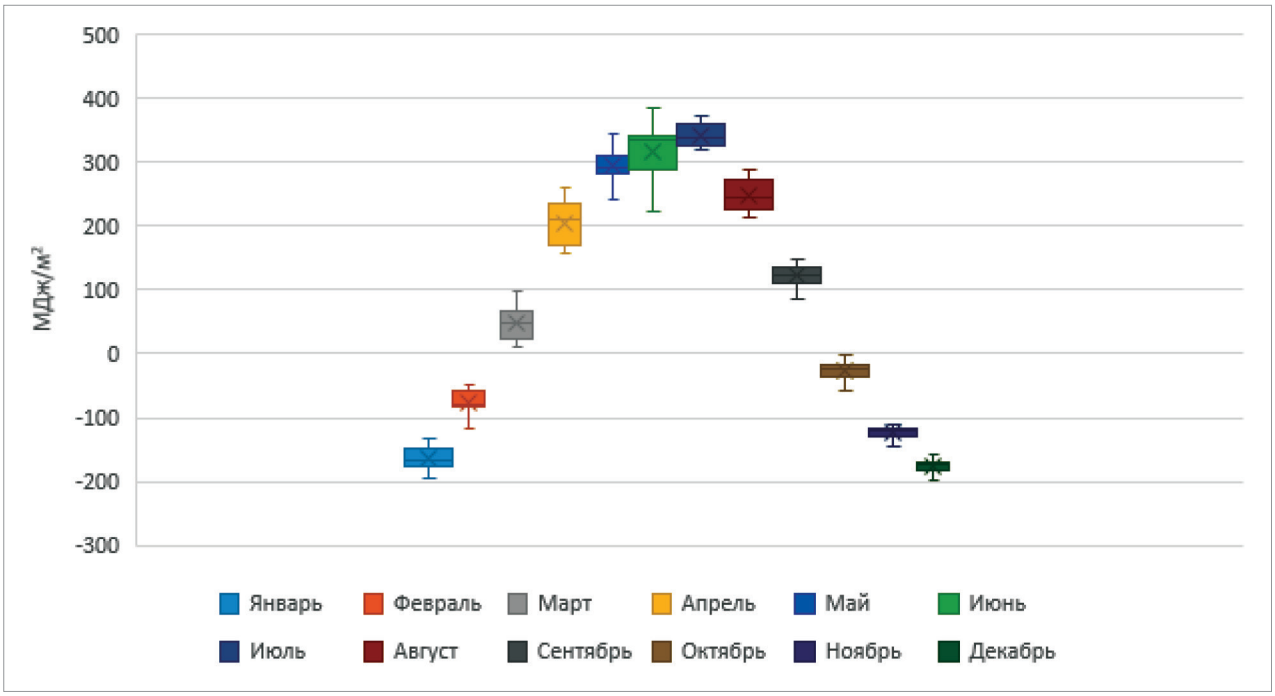


Рисунок 4.2. Внутригодовые средние значения радиационного баланса по месяцам, МДж/м^2

Анализируя показатели радиационного баланса по месяцам за период 2010–2021 годы, заметно, что наибольший разброс величин характерен для теплого периода года, в то время как зимой перепады минимальны (рисунок 4.2). Наибольшая амплитуда изменения значений отмечается в апреле и июне. Учитывая слабые зимние перепады, можно предположить, что изменчивость значений радиационного баланса именно летних месяцев отражается в колебаниях значений годового баланса.

4.1.2. Радиационный баланс пушистодубового леса

Описанные выше значения радиационного баланса относятся к открытому горизонтальному участку без учета растительного покрова. Пушистодубовый лес формирует собственный кроновый, рельеф, который задерживает и отражает некоторое количество поступающей солнечной радиации на своей поверхности, а часть пропускает в подпологовое пространство. Степень пропускания кронами солнечной радиации зависит от сомкнутости крон и их плотности, наличия просветов внутри кроны (таблица 4.1).

Таблица 4.1. Основные параметры древесного яруса фации пушистодубового леса

№ точки	Высота деревьев, м	Сомкнутость крон, %	Плотность кроны, %
1	5,5	80	95
2	5,5	60	80
3	6	60	85
4	5,5	60	90
5	5,5	30	50
6	5,5	70	50
7	4	100	30
8	2	90	40

Окончание таблицы 4.1.

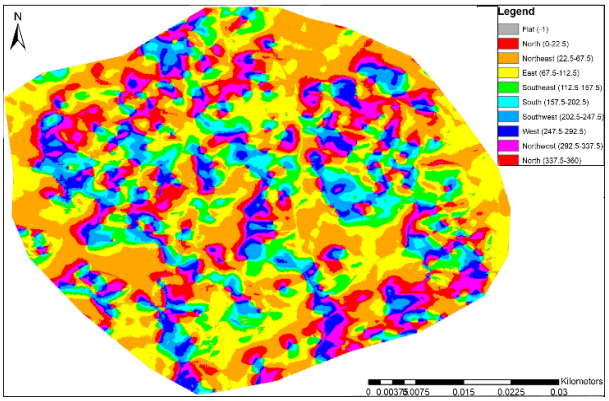
№ точки	Высота деревьев, м	Сомкнутость крон, %	Плотность кроны, %
9	3,5	100	50
10	3	95	50
11	5,5	80	45
12	5	100	10
13	3,5	30	30
14	3,5	70	50
15	3,5	50	20
16	5,5	80	30
17	4,5	90	30
18	5,5	60	60
19	1,7	70	60
20	3,5	100	50
21	3,5	100	100
22	0,3	0	0
23	3,5	40	10
24	1,5	20	2
25	3	80	10

Для лиственных пород деревьев характерно сезонное изменение количества листвы в кроне, вплоть до ее отсутствия в зимний период. Для более полного описания состояния крон деревьев и особенностей задержания ими поступающей радиации наши измерения проводились в летний период, период вегетации и состояния максимального развития кроны. Под сомкнутостью крон понимается доля площади поверхности земли, занятая проекциями крон. Но данный показатель не отражает реального количества поверхности земли, находящегося в тени кроны. Поэтому для более корректного описания кроны также рассматривается и ее плотность.

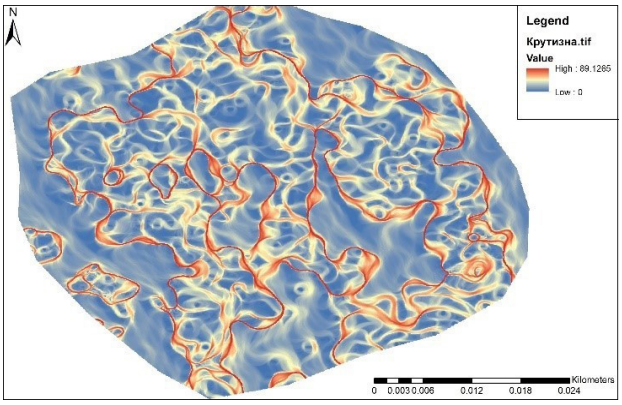
Стоит отметить неравномерность поступления солнечной радиации под полог леса, что объясняется наличием участков, не закрытых кронами, и пространственно-временным распределением теневых масок. Количество поступающей солнечной радиации на конкретную точку поверхности зависит от ее ориентации относительно направления солнечных лучей, т. е. определяется крутизной и экспозицией склонов кронового рельефа (рисунок 4.3).

На основании полученных моделей крутизны и экспозиции склонов кронового рельефа получено поступление суммарной солнечной радиации на поверхность крон в разное время суток (таблица 4.2). Наблюдается характерное распределение поступающей солнечной радиации по склонам кронового рельефа, находящимся в северном полушарии, где наибольшее ее количество поступает на склоны южной экспозиции. На склонах крон западных и восточных экспозиций отмечаются примерно равные значения поступающей солнечной радиации, различие лишь в распределении указанного количества во времени.

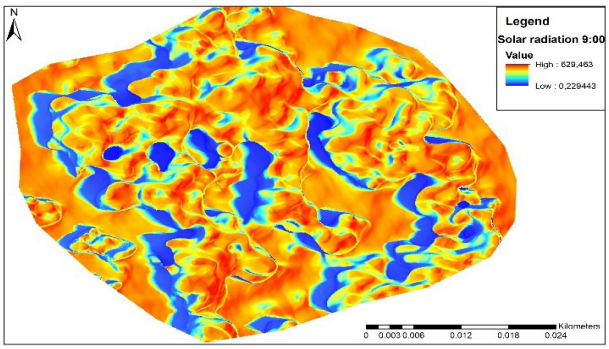
На склонах кронового рельефа северной экспозиции наблюдается наибольшее количество поступающей солнечной радиации на пологих склонах кронового рельефа (0–3°), и это значение постепенно снижается при увеличении крутизны. Резкое снижение суммарной солнечной радиации происходит при увеличении крутизны склонов кронового рельефа более 30°. Также отмечается увеличение количества суммарной солнечной радиации в 15:00 и 17:00 на склонах кронового рельефа средней крутизны (8–15°).



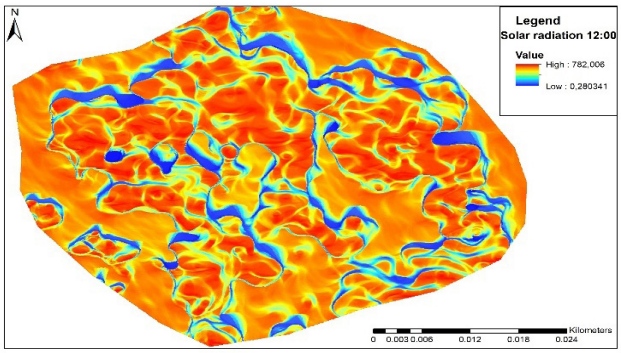
a



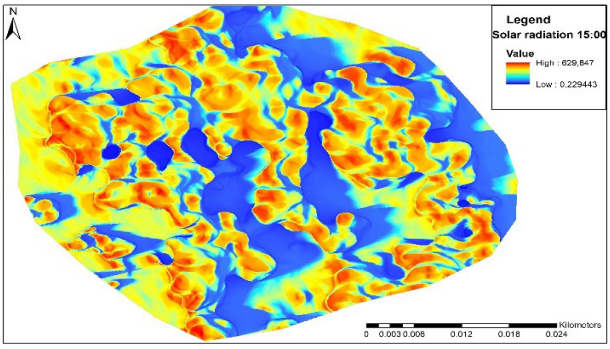
b



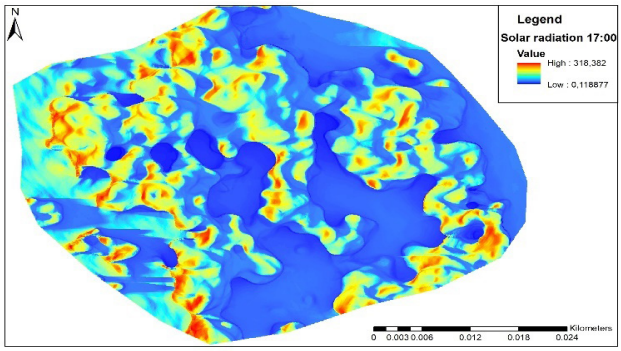
c



d



e



f

Рисунок 4.3. Характеристики кронового рельефа в пушистодубовом лесу: экспозиция склонов кронового рельефа (a); крутизна кронового рельефа (b); поступление суммарной солнечной радиации на поверхность крон в 9:00, Вт·/м^2 (c); поступление суммарной солнечной радиации на поверхность крон в 12:00, Вт·/м^2 (d); поступление суммарной солнечной радиации на поверхность крон в 15:00, Вт·/м^2 (e); поступление суммарной солнечной радиации на поверхность крон в 17:00, Вт·/м^2 (f).

Таблица 4.2. Расчетная величина поступления суммарной солнечной радиации 17 июля 2022 года (дата проведения полевых измерений) в зависимости от крутизны и экспозиции склонов кронового рельефа пушистодубового леса, Вт/м^2.

Экспозиция	Крутизна склонов					
	0–3°	3–8°	8–15°	15–30°	30–45°	более 45°
	9:00					
С	474,67	451,76	468,18	401,19	283,67	71,90
СВ	489,01	504,42	507,66	512,77	495,98	387,28
В	506,82	525,67	540,86	572,54	593,33	337,65
ЮВ	503,63	518,61	550,90	578,77	601,29	552,61
Ю	499,55	497,89	505,78	499,89	416,27	390,14
ЮЗ	493,98	466,57	43,85	382,94	282,26	53,99
З	490,21	456,77	411,20	129,25	177,62	54,22
СЗ	483,93	428,46	430,45	328,88	202,02	49,90
	12:00					
С	697,01	663,83	671,39	554,08	368,53	85,18
СВ	711,23	702,20	667,94	558,26	469,91	168,05
В	730,70	727,65	701,65	647,53	592,47	275,52
ЮВ	734,02	738,42	755,06	734,38	707,93	550,23
Ю	737,96	743,78	763,37	773,53	683,03	650,44
ЮЗ	737,43	731,01	672,14	735,73	682,88	482,94
З	730,75	717,54	705,88	605,50	567,68	279,01
СЗ	721,08	505,15	687,15	599,68	473,87	60,97
	15:00					
С	474,65	299,71	468,06	401,07	48,89	69,72
СВ	475,59	456,40	413,34	319,29	121,19	78,52
В	485,78	462,68	407,84	269,32	91,98	36,71
ЮВ	490,58	474,51	458,10	379,02	308,43	84,64
Ю	499,55	497,89	505,78	499,89	45,73	390,14
ЮЗ	506,11	513,67	234,46	577,62	586,73	508,82
З	500,61	514,92	544,42	131,34	586.71	517,26
СЗ	496,56	74,06	520,40	521,43	495,79	317,89
	17:00					
С	50,85	41,70	178,74	128,82	25,33	36,15
СВ	166,93	110,69	51,44	77,94	46,09	40,70
В	169,98	154,33	120,39	43,16	47,64	19,02
ЮВ	171,71	157,19	139,62	49,86	51,53	41,90
Ю	177,00	117,63	168,80	154,61	23,69	56,65
ЮЗ	182,28	185,85	22,72	197,31	235,39	59,29
З	179,92	53,62	152,40	27,77	37,10	301,15
СЗ	180,17	38,37	210,02	237,01	254,26	25,86
	Сумма за сутки					
С	3958,27	5317,05	5111,05	4292,32	2059,90	789,53
СВ	5344,72	5254,15	4911,59	4572,83	3708,03	2241,04
В	5508,06	5470,72	5084,35	4710,69	3815,68	1854,26
ЮВ	5365,57	5510,57	5606,69	5241,09	5117,60	3984,59
Ю	5543,85	5544,62	5632,39	5573,38	3723,64	4360,25
ЮЗ	5548,32	5304,56	2780,25	1827,29	4877,03	3268,02
З	5496,73	5112,14	5195,77	3203,56	4406,58	147,75
СЗ	5493,69	5406,05	5156,53	4670,29	3777,11	1330,60

Максимальные значения для склонов кронового рельефа северной экспозиции фиксируются на пологих склонах (0–3°) в 12:00, а величины поступления суммарной солнечной радиации в утренние и вечерние часы примерно одинаковые.

В утренние часы на склонах кронового рельефа южной экспозиции значения радиации незначительно выше, чем на северных, но с увеличением крутизны наблюдается значительное превышение. В целом для любого времени суток на пологих склонах кронового рельефа наблюдается наибольшее количество поступающей суммарной солнечной радиации, которое постепенно незначительно уменьшается с увеличением крутизны кронового рельефа. В 12:00 на рассматриваемых склонах отмечаются максимальные значения относительно склонов других экспозиций. В вечернее время 17:00 значения суммарной солнечной радиации значительно ниже, чем в утреннее время, которые резко уменьшаются при увеличении крутизны склонов кронового рельефа более 30°.

Поступление суммарной солнечной радиации на склоны кронового рельефа западной экспозиции в утренние часы отмечается резким спадом в изменении величин при крутизне склонов более 15°. Для полудня характерно постепенное снижение значений с резким уменьшением при увеличении крутизны более 45°. В 15:00 отмечаются максимальные значения относительно склонов кронового рельефа других экспозиций, в течение дня происходят незначительные колебания, без значительных уменьшений при изменении крутизны. В 17:00 значения солнечной радиации значительно ниже, чем в другое время суток с наибольшими значениями на крайне крутых склонах кронового рельефа (более 45°).

На склонах кронового рельефа восточной экспозиции в утреннее время фиксируются максимальные для этого времени значения относительно склонов кронового рельефа других экспозиций, значительное снижение значений отмечается на крайне крутых склонах кронового рельефа крутизной более 45°. Аналогичное распределение значений по крутизне кронового рельефа происходит и в дневное время. Противоположная ситуация складывается в вечернее время (15:00 и 17:00), когда наибольшие значения наблюдаются на пологих склонах кронового рельефа, а при переходе на крутые склоны (15–30°) кронового рельефа происходит резкое падение значений поступления суммарной солнечной радиации.

Усреднение суточных значений поступления суммарной солнечной радиации на поверхность склонов кронового рельефа разной крутизны позволяет оценить в целом ее распределение в зависимости от экспозиции. Таким образом, отмечается существенная разница в значениях поступающей солнечной радиации на склоны кронового рельефа северной и южной экспозиций (рисунок 4.4), что закономерно для Северного полушария. Характер распределения суммарной солнечной радиации на склонах кронового рельефа западной и восточной экспозиций примерно одинаковый, однако на восточных и особенно юго-восточных экспозициях склонов кронового рельефа поступление суммарной солнечной радиации больше, что скорее всего связано с ориентацией склона, на котором располагается участок пушистодубового леса.

Аналогично любой поверхности поступающая на рельеф крон солнечная радиация частично отражается. Количество отраженной радиации зависит от отражающей способности поверхности, альбедо, среднее значение для лиственного леса которого равно 18%. Таким образом, получаем следующее распределение элементов радиационного баланса для поверхности крон (таблица 4.3). Для отраженной и поглощенной радиации характерны существенные разбросы величин как во времени, так и в пространстве, сохраняя закономерную зависимость от крутизны и экспозиции склонов кронового рельефа. В течение светового дня элементы радиационного баланса увеличивают свое значение до максимума в 12:00 и снижают к 17:00.

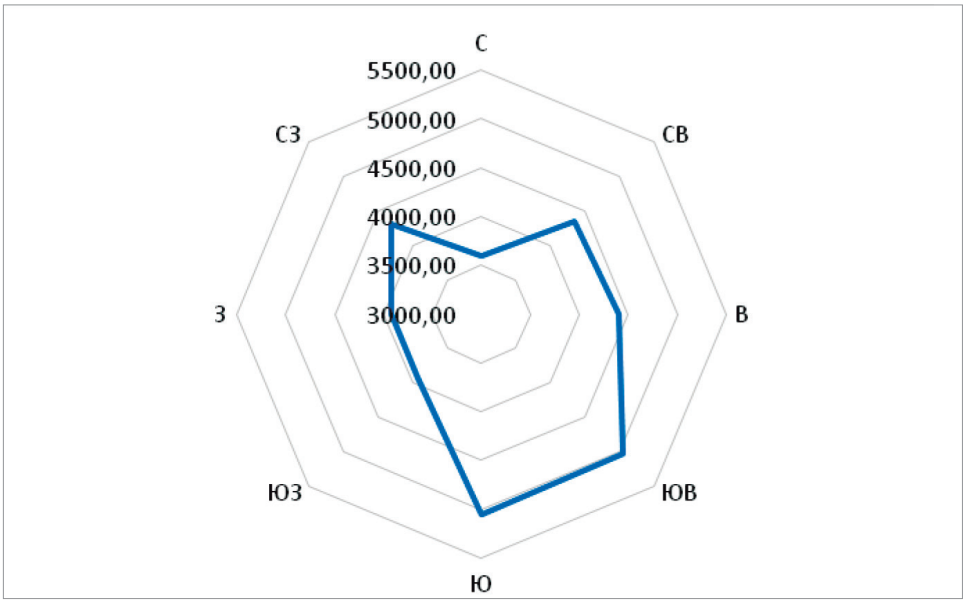


Рисунок 4.4. Инсоляционная диссимметрия поступления суммарной солнечной радиации на склоны кронового рельефа разной экспозиции пушистодубового леса, Вт/м^2

Таблица 4.3. Величины элементов радиационного баланса поверхности крон участка пушистодубового леса, Вт/м^2

Элементы радиационного баланса		Время суток			
		9:00	12:00	15:00	17:00
Суммарная радиация	Средняя	463,83	590,18	332,26	97,60
	Максимальная	593,33	763,37	505,78	178,74
	Минимальная	71,90	85,18	36,71	19,02
Отраженная радиация	Средняя	83,49	106,23	59,81	17,57
	Максимальная	106,80	137,41	91,04	32,17
	Минимальная	12,94	15,33	6,61	3,42
Поглощенная радиация	Средняя	380,34	483,95	272,45	80,03
	Максимальная	486,53	625,96	414,74	146,57
	Минимальная	58,96	69,85	30,10	15,60

Важно отметить, что представленные величины были бы верны в случае, если вся поступающая солнечная радиация задерживалась бы кронами, но в реальных условиях всегда существует определенный процент пропускания под полог леса. Следовательно, представленные выше значения завышены. Поэтому для описания вертикальной структуры распределения энергетических потоков в пушистодубовом лесу проводилось изучение количества пропускаемой кронами солнечной радиации.

Согласно регулярной сетке точек получена пространственно-временная структура освещенности подпологового пространства пушистодубового леса (рисунок 4.5).

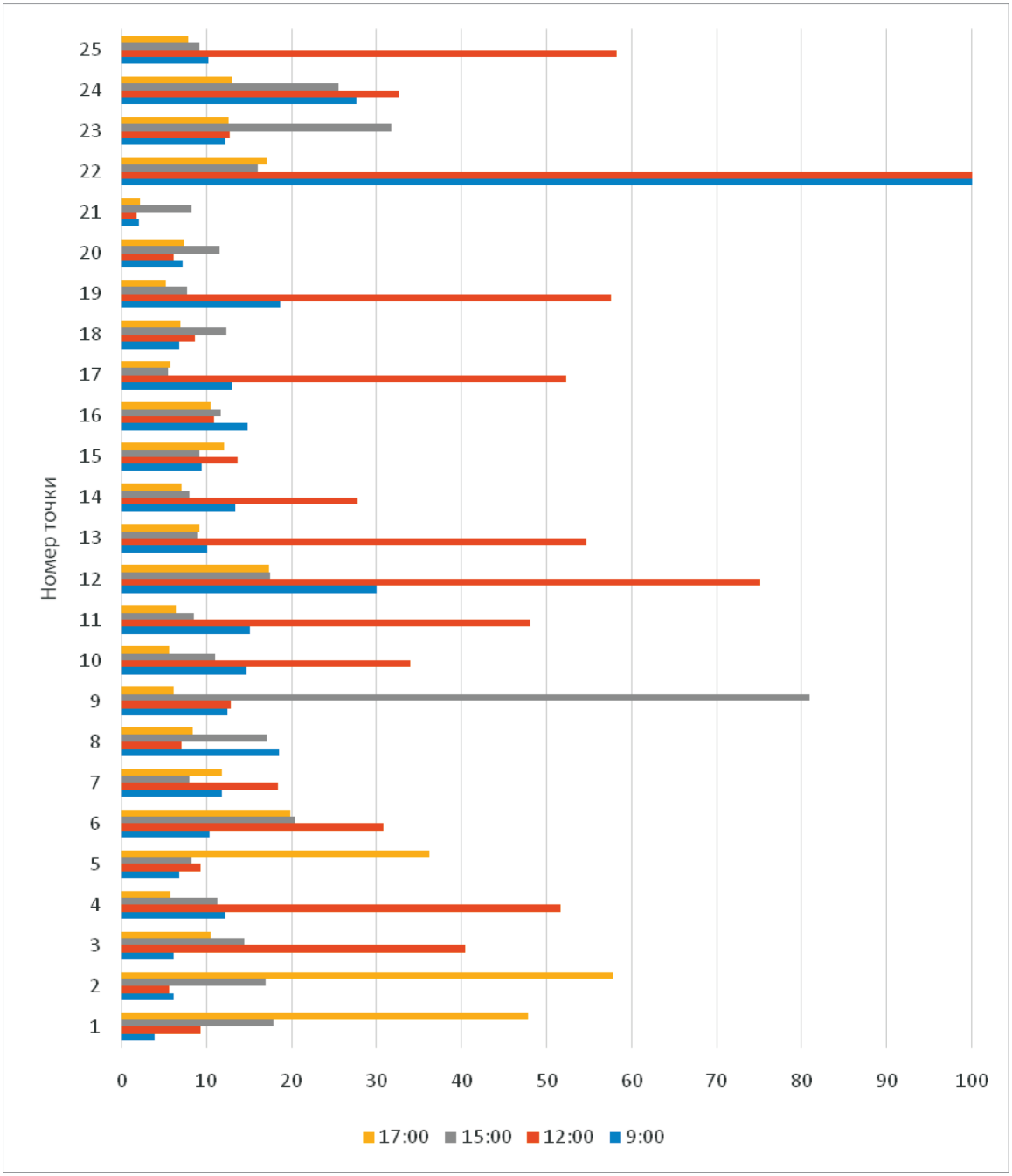


Рисунок 4.5. Пространственно-временная структура доли пропускания суммарной солнечной радиации пологом леса

Рисунок 4.5 демонстрирует существенную пространственно-временную неоднородность пропускания суммарной солнечной радиации кронами деревьев. В большинстве случаев количество солнечной радиации, поступившей под крону, не превышает 20% от изначального значения, при этом в тех же точках наблюдения фиксируются значения, превышающие 40 и 50% пропускания солнечной радиации. Представленная схема демонстрирует, что для каждой точки характерно свое время пропускания максимального и минимального количества радиации. Это объясняется изменением распределения просветов и теневых масок в пологе крон в зависимости от времени суток и угла попадания солнечных лучей. Ярким примером подобного изменения может служить точка № 22, в которой в первую половину дня поступает количество солнечной радиации, соответствующее открытому участку местности, а во вторую половину дня находится в тени.

Ранее Р. В. Горбунов с соавторами (2019) описали отсутствие корреляции между долей пропускания и характеристиками вертикальной структуры. Поэтому модель кронового рельефа не учитывалась при построении пространственной структуры величины пропускания суммарной солнечной радиации в разное время суток (рисунок 4.6).

При рассмотрении пространственного изменения пропускания суммарной солнечной радиации пологом леса выделяются участки с максимальной долей пропускания, сами по себе они являются открытыми, не попадающими под крону деревьев или граничащими с отрытыми участками леса. Но так как они находятся внутри растительного сообщества, то окружающие их соседние участки оказывают значительно влияние на протекающие в них процессы распределения поступающей энергии. В свою очередь, открытые и полуоткрытые участки также оказывают обратное влияние. Таким образом, в течение светового дня формируются условия, в которых окружающие деревья формируют устойчивую тень на соседнем участке, а открытые участки позволяют суммарной солнечной радиации беспрепятственно проникать под полог леса.

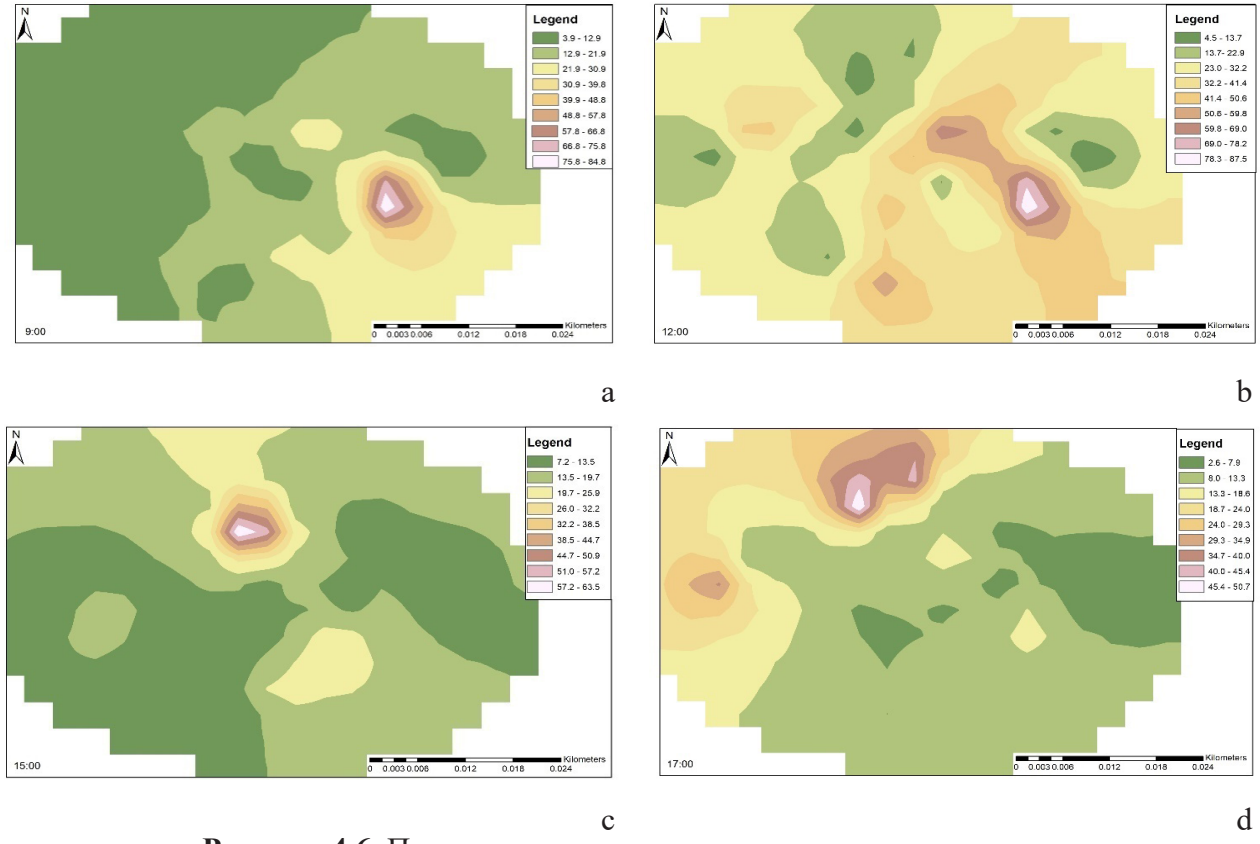


Рисунок 4.6. Пространственное изменение доли пропускания суммарной солнечной радиации пологом пушистодубового леса, %: 09:00 (a); 12:00 (b); 15:00 (c); 17:00 (d)

Проанализировав полученные значения поступления суммарной солнечной радиации и степень пропускания ее пологом леса, получены статистические значения величин суммарной солнечной радиации, поступающей в подпологовое пространство (таблица 4.4).

Таблица 4.4. Количество суммарной солнечной радиации, прошедшей через кроны деревьев, Вт/м^2

Суммарная солнечная радиация	**Время**			
	9:00	**12:00**	**15:00**	**17:00**
Средняя	72,72	183,67	52,61	13,61
Максимальная	463,83	590,18	268,77	56,35
Минимальная	9,43	10,45	17,85	2,02

Проходя через кроны деревьев, солнечная радиация также делится на отраженную и поглощенную. Отраженное коротковолновое излучение невозможно оценить на данный момент из-за сложности и мозаичности поверхностей под пологом крон. Поглощенная и преобразованная в длинноволновую радиация образует тепловой поток излучения подстилающей поверхности, направленный в атмосферу, и собственное тепловое излучение атмосферы на поверхность земли. На основе этих двух величин получены значения эффективного излучения (таблица 4.5).

Таблица 4.5. Величины элементов длинноволновой части радиационного баланса пушистодубового леса в период измерений, Вт/м^2

Элементы радиационного баланса	Время			
	9:00	12:00	15:00	17:00
Тепловое излучение подстилающей поверхности	406,90	409,68	414,16	415,29
Собственное тепловое излучение атмосферы	334,12	335,65	323,88	316,35
Эффективное излучение подстилающей поверхности (поверхность почвы, листовой опад, ярус трав)	82,80	84,10	100,00	108,44

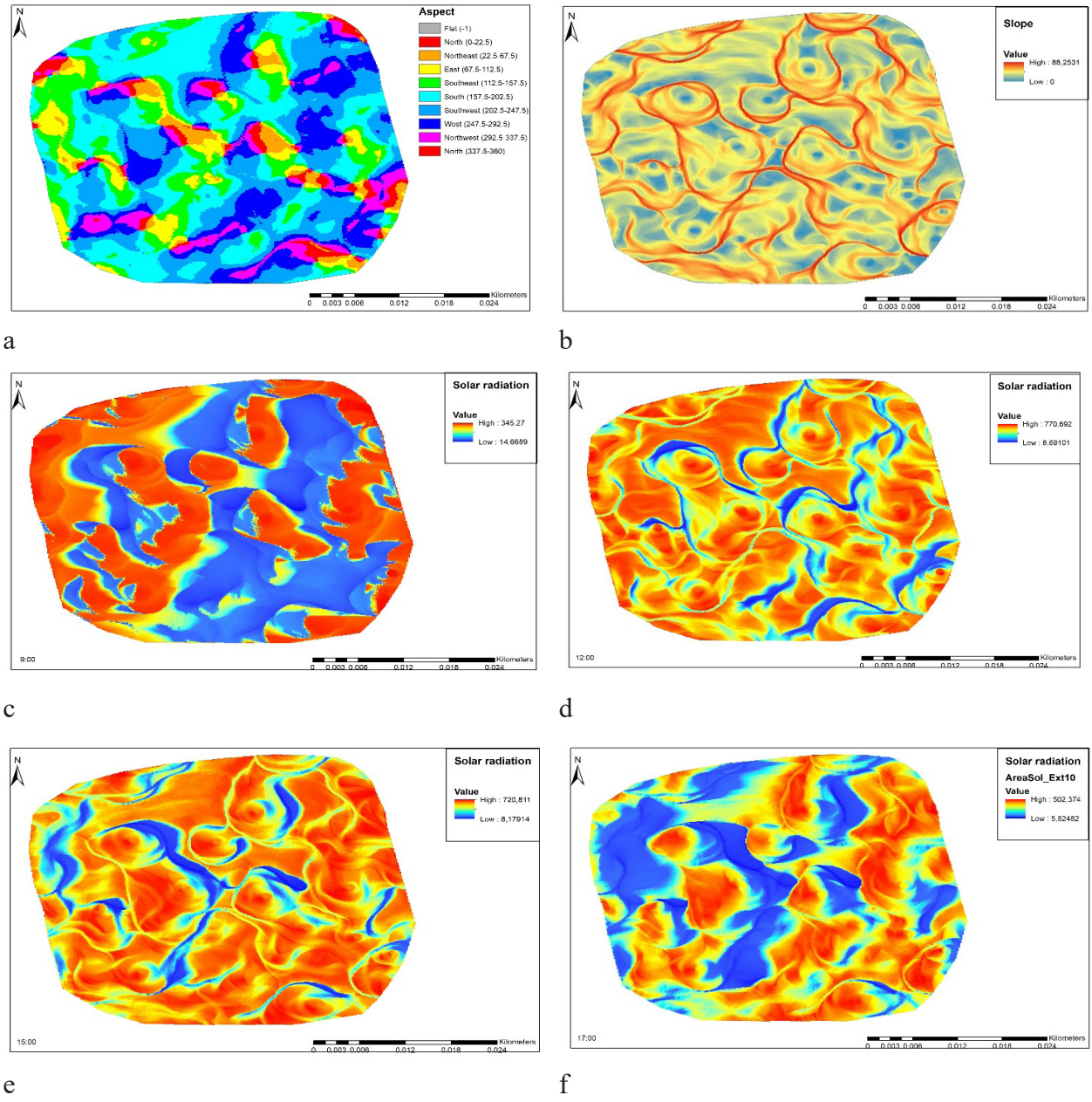
Сравнивая значения таблиц 4.4 и 4.5, даже не имея возможности рассчитать коротковолновую часть излучения радиационного баланса, отмечается превышение исходящей радиации над приходящей в рамках средних значений. Исключение составляет полуденное время, на которое приходится дневной максимум поступающей суммарной солнечной радиации. Кроме того, отмечается наличие значений поступающей радиации, существенно превышающих эффективное излучение подстилающей поверхности. Это объясняется наличием существенных просветов в кроне деревьев, формирующих положительный радиационный баланс подкронового пространства леса, в отличие от основной части, находящейся в тени крон деревьев, с отрицательным радиационным балансом. Данное распределение значений демонстрирует сложную организацию и протекание процессов распределения потоков вещества и энергии в пушистодубовом лесу.

4.1.3. Радиационный баланс можжевелового леса

Для можжевелового леса также характерна сложная морфометрия кронового рельефа и неоднородное пропускание кронами солнечной радиации под полог леса (рисунок 4.7). Однако стоит отметить, что наравне с описанными процессами важную роль играет характер роста можжевельника высокого. Для данного типа леса характерна вертикально вытянутая форма дерева, образующая в большинстве случаев широкие конусы, что дает относительно большое значение сомкнутости крон при фактически небольшом закрытии неба. Также стоит отметить влияние горного рельефа, при котором сообщество произрастает на склонах южной экспозиции крутизной до 45°, из-за чего солнечные лучи проникают под полог сквозь ветви разных уровней. При этом высота деревьев и густой рост ветвей вдоль всего ствола обеспечивают наличие широкой тени даже на соседних относительно открытых участках. Поэтому оценка рассматриваемого сообщества только с точки зрения сомкнутости крон также являлась бы некорректной.

На основании полученных моделей крутизны и экспозиции склонов кронового рельефа получено поступление суммарной солнечной радиации на поверхность крон в разное время суток (таблица 4.6). Согласно рисунку 4.7 и таблице 4.6, наблюдается распределение поступающей солнечной радиации согласно ориентации склона, где наибольшее ее количество поступает на склоны южной экспозиции, а северная экспозиция находится в некотором затене-

нии в зависимости от крутизны склона. На склонах западной и восточной экспозиции отмечаются равные значения поступающей солнечной радиации. В целом распределение радиации происходит достаточно равномерно с плавным увеличением значений от склонов северной экспозиции к южным.



a b c d e f

Рисунок 4.7. Характеристики кронового рельефа в можжевеловом лесу: экспозиция склонов кронового рельефа (a); крутизна кронового рельефа (b); поступление суммарной солнечной радиации на поверхность крон в 9:00, Вт·/м^2 (c); поступление суммарной солнечной радиации на поверхность крон в 12:00, Вт·/м^2 (d); поступление суммарной солнечной радиации на поверхность крон в 15:00, Вт·/м^2 (e); поступление суммарной солнечной радиации на поверхность крон в 17:00, Вт·/м^2 (f).

Таблица 4.6. Расчетная величина поступления суммарной солнечной радиации 17 июля 2022 года (дата проведения полевых измерений) в зависимости от крутизны и экспозиции склонов кронового рельефа в можжевеловом лесу, Вт/м^2

Экспозиция	Крутизна склонов					
	0–3°	3–8°	8–15°	15–30°	30–45°	более 45°
	9:00					
С	268,32	263,33	281,24	267,93	253,88	171,89
СВ	255,26	252,96	235,59	286,65	291,26	247,55
В	252,01	238,80	229,90	264,83	281,73	263,07
ЮВ	243,47	238,70	229,40	233,40	261,62	296,12
Ю	232,32	229,64	218,92	117,54	264,03	272,20
ЮЗ	199,80	209,54	229,53	167,29	165,08	96,95
З	239,55	196,74	224,02	183,76	128,54	62,84
СЗ	255,71	225,71	254,17	245,20	188,14	67,16
12:00						
С	631,04	609,93	574,55	497,18	358,48	146,09
СВ	640,03	630,10	570,99	592,68	493,75	263,17
В	664,46	654,77	663,52	662,23	636,54	469,56
ЮВ	670,46	691,79	708,21	720,38	713,29	589,73
Ю	670,76	686,83	689,90	698,60	695,81	565,35
ЮЗ	646,53	626,22	640,27	625,89	577,42	427,51
З	634,39	599,06	595,06	557,23	459,62	238,89
СЗ	623,52	579,18	555,64	495,58	358,67	111,52
15:00						
С	574,91	556,81	551,77	491,79	389,39	196,80
СВ	584,23	531,43	467,80	403,11	260,20	77,04
В	575,74	532,60	452,02	389,15	289,17	107,98
ЮВ	578,15	545,86	476,50	400,17	378,29	247,87
Ю	592,19	598,48	578,83	585,73	593,82	482,55
ЮЗ	593,67	635,22	644,82	676,82	682,96	612,84
З	596,52	614,19	636,07	664,13	665,28	561,57
СЗ	593,05	587,02	573,28	569,59	520,05	341,82
17:00						
С	273,17	282,44	304,32	286,10	267,92	177,10
СВ	254,00	245,56	195,80	160,69	88,66	38,01
В	254,42	210,57	169,99	122,69	66,13	44,83
ЮВ	245,71	225,25	199,41	135,91	91,72	58,49
Ю	282,25	287,77	227,27	220,50	188,88	192,00
ЮЗ	284,94	315,33	318,37	361,51	397,02	397,08
З	292,10	328,40	365,88	414,68	458,58	456,73
СЗ	285,24	319,68	334,01	366,23	376,07	321,16
Сумма за сутки						
С	4777,38	4706,90	4613,18	4067,73	3216,53	1652,03
СВ	4729,75	4623,63	4195,21	4166,31	3374,45	1863,73
В	4769,76	4598,78	4310,61	4266,82	4017,07	2890,82
ЮВ	4784,98	4804,30	4606,17	4440,88	4403,00	3680,60
Ю	4872,39	4981,83	4784,71	4732,95	4790,28	3945,92
ЮЗ	4644,16	4748,31	4883,50	4783,61	4653,39	3928,75
З	4775,30	4679,57	4770,32	4660,30	4346,98	3346,59
СЗ	4805,51	4634,09	4533,00	4267,79	3562,99	2054,94

На склонах кронового рельефа северной экспозиции наблюдается наибольшее количество поступающей солнечной радиации на пологих склонах (0–3°), и это значение постепенно снижается при увеличении крутизны. Резкое снижение суммарной солнечной радиации

происходит при увеличении крутизны склонов более 30°. Также отмечается увеличение количества суммарной солнечной радиации в 12:00 и 15:00. В вечернее время в 17:00 крутизна склонов незначительно отражается на количестве поступающей радиации, заметное снижение наблюдается только на очень крутых склонах (более 45°). Максимальные значения для склонов северной экспозиции фиксируются на пологих склонах (0–3°) в 12:00, а величины поступления суммарной солнечной радиации в утренние и вечерние часы примерно одинаковые.

На склонах кронового рельефа южной экспозиции значения радиации незначительно ниже, чем на склонах северных экспозиций, но на очень крутых склонах наблюдается значительное превышение. В 12:00 на рассматриваемых склонах отмечаются максимальные значения относительно склонов других экспозиций, в это время отмечается рост показателей с увеличением крутизны, и только на склонах более 45° происходит снижение. В 15:00 и 17:00 значения суммарной солнечной радиации незначительно колеблются на склонах разной крутизны, только при крутизне более 45° наблюдается уменьшение значений.

Поступление суммарной солнечной радиации на склоны кронового рельефа западной экспозиции утром и днём характеризуется уменьшением величин с увеличением уклона. Для 15:00 наблюдается постепенное увеличение значений с резким спадом при увеличении крутизны более 45°. В 17:00 в течение дня происходит постепенный рост значений при увеличении крутизны.

На склонах кронового рельефа восточной экспозиции максимальные значения поступающей солнечной радиации отмечаются на крутых склонах крутизной 30–45°. Аналогичное распределение значений по крутизне происходит и в дневное время, с резким спадом на крайне крутых склонах. Обратная картина происходит в вечернее время (15:00 и 17:00), наибольшие значения поступления суммарной солнечной радиации наблюдаются на пологих склонах, которые уменьшаются при переходе на крутые склоны.

Для каждого склона характерен значительный рост поступающей солнечной радиации к 12:00, небольшое уменьшение в 15:00 и резкий спад к 17:00. Усреднение суточных значений поступления суммарной солнечной радиации на поверхность склонов разной крутизны позволяет оценить в целом ее распределение на поверхности кронового рельефа в зависимости от экспозиции. Однако следует отметить значительный вклад распределения теневых масок. Так, значения поступающей радиации могут отличаться в несколько раз, наибольшие различия отмечаются в полдень. Так, например, на южном склоне минимальные значения радиации опускаются до 20 Вт/м^2 в тени, а значения на освещенном участке достигают до 345 Вт/м^2 утром, 770 Вт/м^2 в 12:00 и 500 Вт/м^2 в 17:00. Таким образом, отмечается существенное сглаживание средних значений поступающей солнечной радиации на склоны различной экспозиции (рисунок 4.8).

Аналогично пушистодубовому лесу на основании значения альбедо получено количество отраженной радиации. Таким образом, получаем следующее распределение элементов радиационного баланса для поверхности крон (таблица 4.7).

Аналогично суммарной солнечной радиации для отраженной и поглощенной характерны существенные разбросы величин как во времени, так и в пространстве, сохраняя закономерную зависимость от крутизны и экспозиции склонов кронового рельефа. В течение светового дня элементы радиационного баланса увеличивают свое значение до максимума в 12:00 и снижают к 17:00.

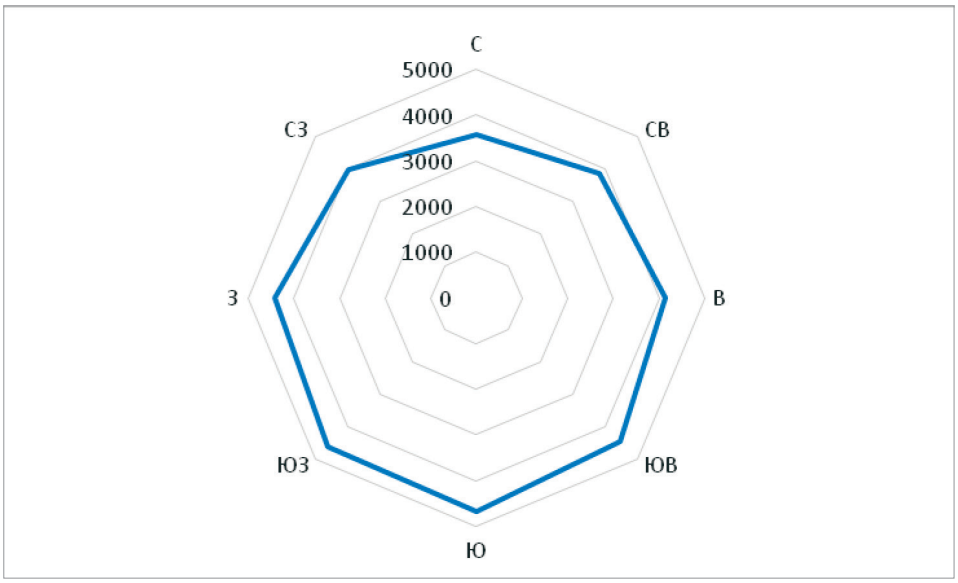


Рисунок 4.8. Инсоляционная диссимметрия поступления суммарной солнечной радиации на склоны кронового рельефа разной экспозиции можжевелового леса, Вт/м^2

Таблица 4.7. Величины элементов радиационного баланса поверхности крон можжевелового леса, Вт/м^2

Элементы радиационного баланса		Время суток			
		9:00	12:00	15:00	17:00
Суммарная радиация	Средняя	224,65	566,92	505,40	253,97
	Максимальная	296,12	720,38	682,96	458,58
	Минимальная	62,84	111,52	77,04	38,01
Отраженная радиация	Средняя	31,45	79,36	70,76	35,55
	Максимальная	41,45	100,85	95,61	64,20
	Минимальная	8,79	15,61	10,78	5,32
Поглощенная радиация	Средняя	193,20	487,55	434,64	218,41
	Максимальная	254,66	619,52	587,34	394,38
	Минимальная	54,04	95,91	66,25	32,69

Рисунок 4.9 демонстрирует существенную пространственно-временную неоднородность пропускания суммарной солнечной радиации кронами деревьев. В большинстве случаев количество солнечной радиации, поступившей под крону, не превышает 10–20% от изначального значения. При этом в тех же точках наблюдения фиксируются значения, превышающие 40 и 50% пропускания солнечной радиации.

Представленная схема демонстрирует, что для каждой точки характерно свое время пропускания максимального и минимального количества радиации. Это объясняется изменением распределения просветов и теневых масок в пологе крон в зависимости от времени суток и угла падения солнечных лучей. Наибольший перепад в изменении значений фиксируется в точках № 9 и 11, в которых в определенную часть дня поступает количество солнечной радиации, соответствующее открытому участку местности.

Как и в пушистодубовом лесу, модель кронового рельефа не учитывалась при построении пространственной структуры величины пропускания суммарной солнечной радиации в разное время суток в можжевеловом сообществе (рисунок 4.10).

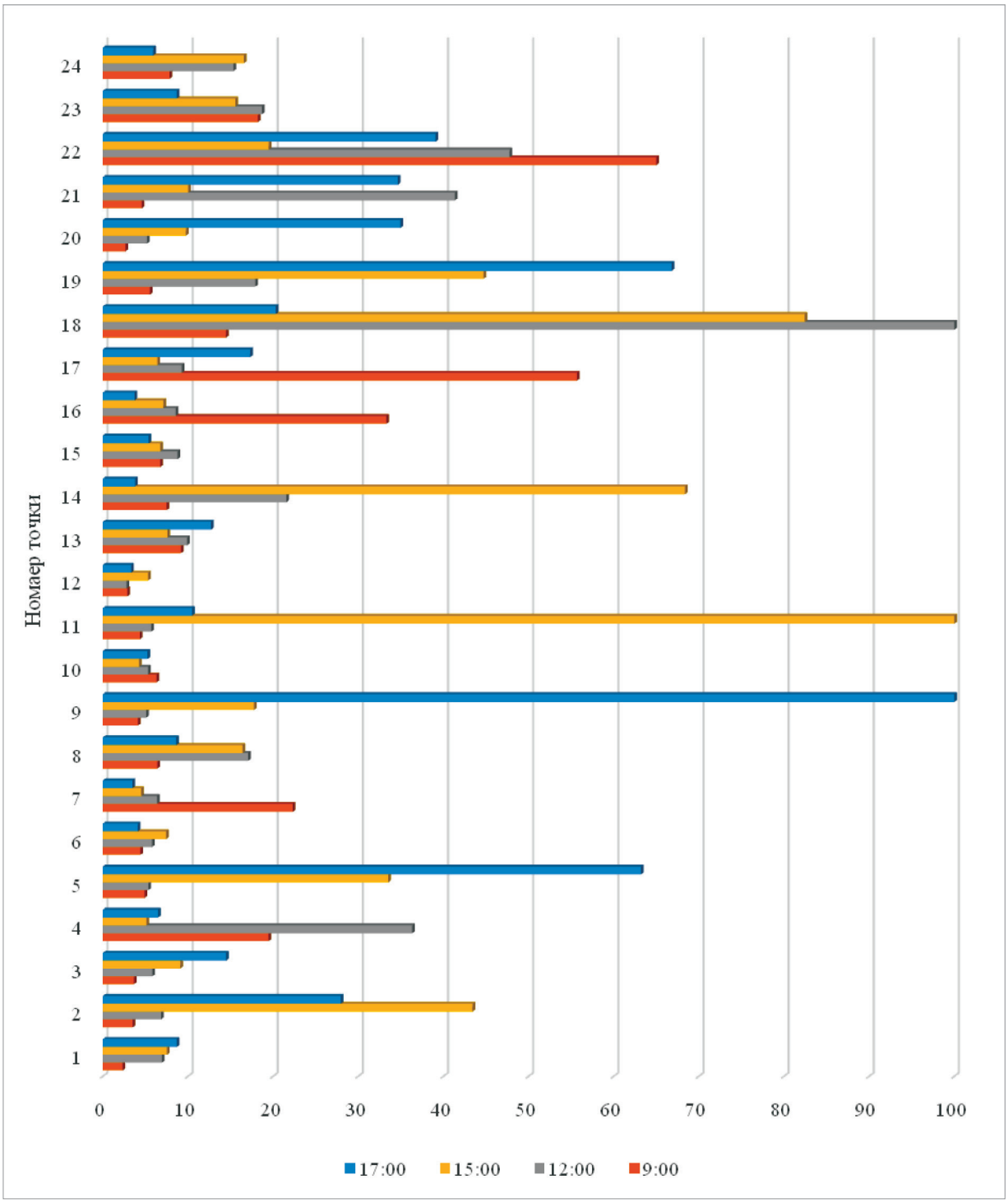


Рисунок 4.9. Пространственно-временная структура доли пропускания суммарной солнечной радиации пологом можжевелового леса

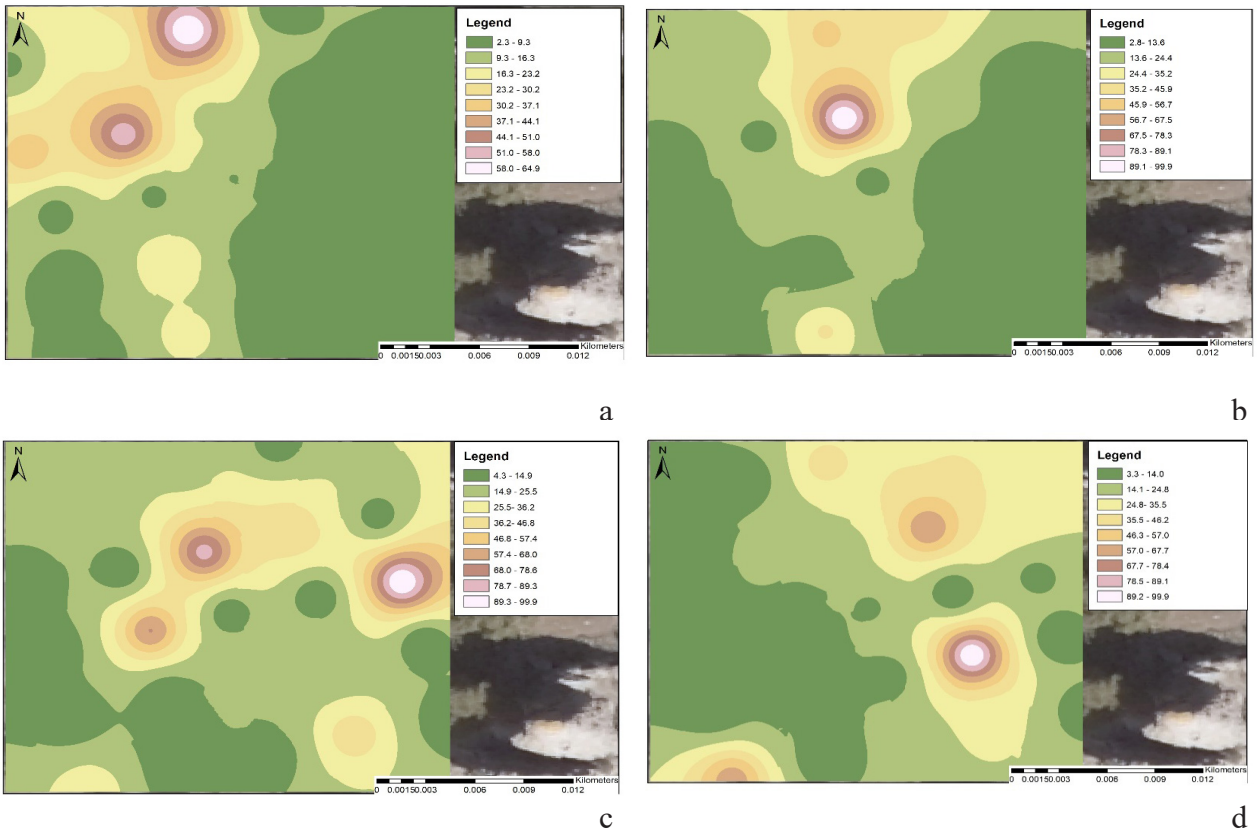


Рисунок 4.10. Пространственное изменение доли пропускания суммарной солнечной радиации пологом можжевелового леса, %: 9:00 (a); 12:00 (b); 15:00 (c); 17:00 (d)

При рассмотрении пространственного изменения пропускания суммарной солнечной радиации пологом леса выделяются участки с максимальной долей пропускания, сами по себе они являются открытыми, не попадающим под крону деревьев, или граничащими с отрытыми участками леса. Но так как они находятся внутри растительного сообщества, то окружающие их соседние участки оказывают значительно влияние на протекающие в них процессы распределения поступающей радиации. В свою очередь открытые и полуоткрытые участки также оказывают обратное влияние. Таким образом, в течение светового дня формируются условия, в которых окружающие деревья формируют устойчивую тень на соседнем участке, а открытые участки позволяют проникать суммарной солнечной радиации беспрепятственно под полог леса.

Проанализировав полученные значения поступления суммарной солнечной радиации и степень пропускания ее пологом леса, получены статистические значения величин суммарной солнечной радиации, поступающей в подпологовое пространство (таблица 4.8).

Таблица 4.8. Количество суммарной солнечной радиации, прошедшей через кроны деревьев, Вт/м^2

Суммарная солнечная радиация	**Время**			
	9:00	**12:00**	**15:00**	**17:00**
Средняя	25,23	93,78	118,51	57,67
Максимальная	124,77	543,84	517,97	271,73
Минимальная	4,48	15,26	22,02	9,05

На основе величин теплового потока излучения подстилающей поверхности и собственного теплового излучения атмосферы получены значения эффективного излучения (таблица 4.9).

Таблица 4.9. Величины элементов длинноволновой части радиационного баланса можжевелового леса в период измерений, Вт/м^2

Элементы радиационного баланса	Время			
	9:00	12:00	15:00	17:00
Тепловое излучение подстилающей поверхности	376,78	427,19	427,55	414,90
Собственное тепловое излучение атмосферы	440,07	479,61	476,47	473,98
Эффективное излучение подстилающей поверхности (поверхность почвы, листовой опад, ярус трав)	74,59	65,23	61,75	71,53

Отмечается превышение исходящей радиации над приходящей в рамках средних значений в утреннее и вечернее время, а положительный баланс отмечается в 12:00 и 15:00, в период дневного максимума поступающей суммарной солнечной радиации. Кроме того, отмечается наличие значений поступающей радиации, существенно превышающих эффективное излучение подстилающей поверхности. Это объясняется наличием существенных просветов в кроне деревьев, формирующих положительный радиационный баланс подкронового пространства леса, в отличие от основной части, находящейся в тени крон деревьев, с отрицательным радиационным балансом.

4.1.4. Сравнительный анализ радиационного баланса пушистодубового и можжевелового лесов

В пушистодубовых и можжевеловых 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.

И в пушистодубовом, и в можжевеловом лесах наибольше количество солнечной радиации приходится на склоны южной экспозиции, при этом отмечаются превышения значений за счет ориентации склонов рельефа: в пушистодубовом лесу, расположенном на склоне восточной экспозиции, значения солнечной радиации, поступающей на поверхность кронового рельефа восточной экспозиции, превышают значения на склонах западной экспозиции; можжевеловый лес располагается на склоне южной экспозиции хребта Карагач – завышены значения на склонах кронового рельефа южной экспозиции.

При рассмотрении величин элементов радиационного баланса на обоих участках максимум суммарной радиации приходится на 12:00, при этом в 9:00 в можжевеловом сообществе наблюдается низкое значение по отношению к пушистодубовому, и наоборот в 17:00, что определяется горным рельефом и существенным затенением в указанные периоды времени. Аналогичное распределение распространяется на отраженную и поглощенную солнечную радиацию.

На обоих участках отмечается пространственно-временная неоднородность пропускания солнечной радиации пологом, при которой большая часть подкронового пространства находится в тени крон большую часть светового дня, при этом имея в каждой точке индивидуальный временной период с наибольшим пропусканием. Для пушистодубового леса наибольшее количество пропускаемой солнечной радиации характерно в 12:00, а в можжевеловом в 15:00. Также различия проявляются при распределении радиации в утреннее и вечернее время: в пушистодубовом лесу количество пропускаемой солнечной радиации в утреннее время преобладает над вечерним, в то время как в можжевеловом – в вечернее.

Распределение длинноволновой части радиационного баланса в пушистодубовом и можжевеловом лесу в течение суток также разнится: в пушистодубовом лесу происходит посте-

пенное изменение показателей, увеличение теплового и эффективного излучения подстилающей поверхности и уменьшение теплового излучения атмосферы, в то время как в можжевеловом сообществе выделяются периоды 12:00 и 15:00 как время с наибольшими значениями теплового и эффективного излучения подстилающей поверхности и наименьшими значениями теплового излучения атмосферы.

В обоих случаях, несмотря на кардинально отличающуюся форму и структуру лесного сообщества, отмечается отрицательный радиационный баланс подкронового 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 можжевелового и пушистодубового лесов.

4.2. Тепловой баланс

4.2.1. Тепловой баланс открытого участка в зоне пушистодубового леса

Тепловой баланс территории в целом зависит от климатических параметров и характера подстилающей поверхности. Основным характеризующим параметром является радиационный баланс, распределение которого в ландшафте определяет его состояние и формирует потоки тепла.

4.2.1.1. Радиационный баланс

Благодаря мониторинговым измерениям можно проследить основные тенденции изменения радиационного баланса и его распределения по нескольким сезонам, динамику в течение месяца и дня (рисунок 4.11).

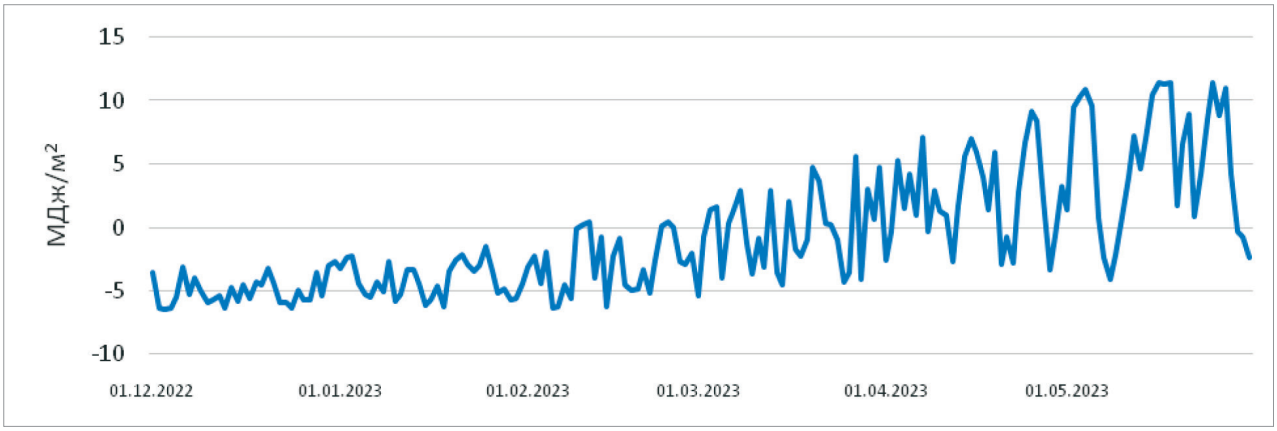


Рисунок 4.11. Суточный радиационный баланс на открытом участке в период с 1 декабря 2022 г. по 31 июля 2023 г.

При рассмотрении суточных изменений значений радиационного баланса в зимний, весенний и летний период отмечаются закономерно положительные величины в дневное время и отрицательные в ночное (рисунок 4.12). Зимой в силу короткого светового дня и небольшого угла наклона солнца небольшие положительные значения баланса наблюдаются только на протяжении нескольких часов в период с 13 до 17 часов. С увеличением светового дня и положения солнца весной происходит существенный рост как значений положительного радиационного баланса, так и его продолжительность, в летнее время значения также увеличиваются, а их изменение носит более плавный характер.

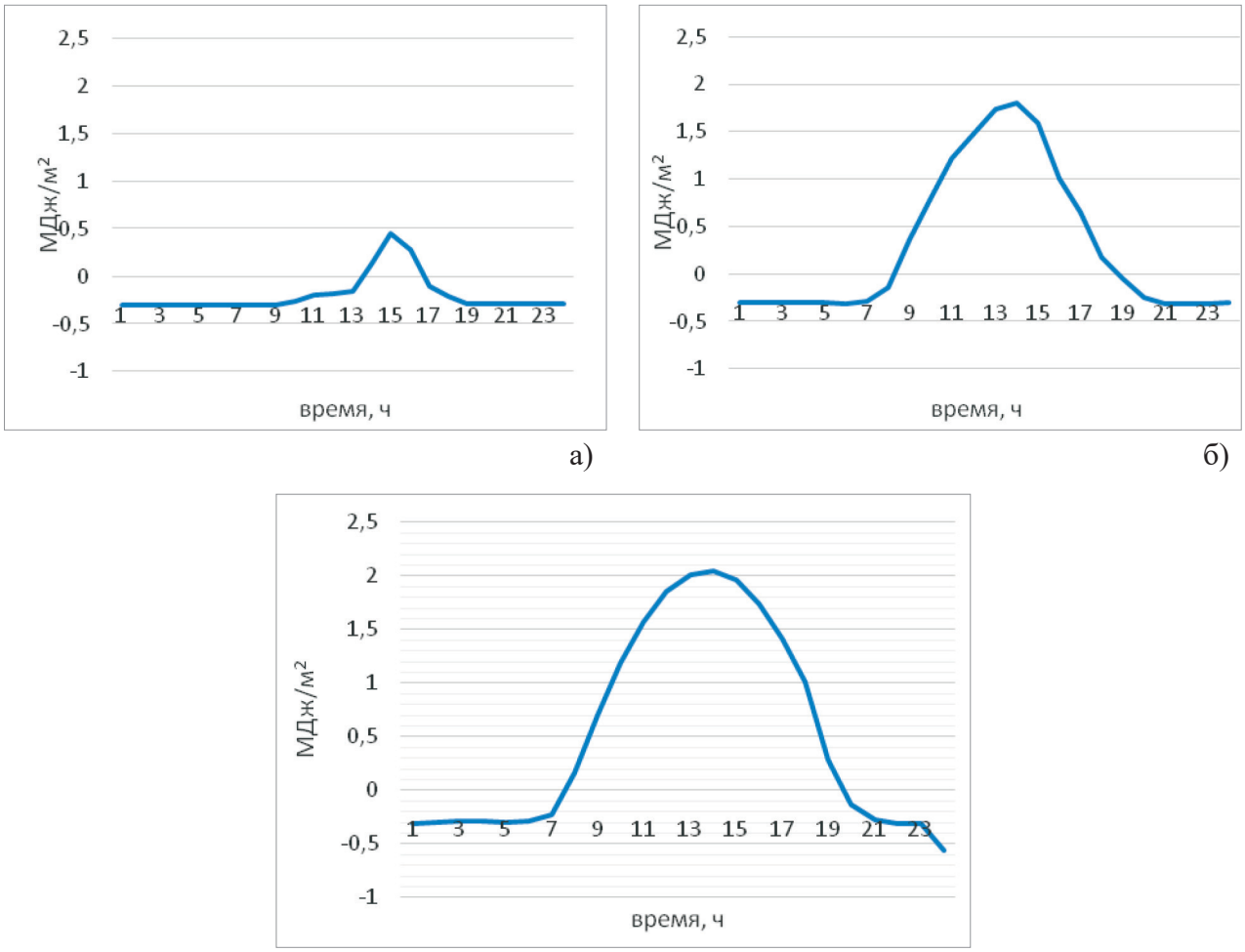


Рисунок 4.12. Радиационный баланс открытого участка на примере:
а) 17 января 2023 г.; б) 15 апреля 2023 г.; в) 6 июня 2023 г.

Согласно уравнению теплового баланса, происходит распределение значений радиационного баланса на перенос тепла и энергии внутри ландшафтной системы. Всего выделяют три основных направления преобразования энергии: затраты тепла на испарение, вертикальный турбулентный теплообмен и поток тепла в почвенном слое.

4.2.1.2. Затраты тепла на испарение

Явное тепло идет на турбулентный поток тепла в атмосфере и поток тепла в почве. Доля скрытого тепла приходится на затраты на испарение, она равна произведению скрытой теплоты испарения и величины испарения. При этом скрытая теплота испарения зависит от температуры испаряющей поверхности (Будыко, 1956). Для открытого участка характерны следующие колебания значений во времени (рисунок 4.13).

Аналогично радиационному балансу распределение значений затрат тепла на испарение неравномерное с постепенным увеличением в весенний период. В процентном соотношении затраты тепла на испарение к радиационному балансу имеют крайне неоднородный характер, отмечаются также отрицательные значения, обозначающие противоположное направление потока тепла. В данном случае фиксируются затраты тепла на испарение при отрицательных значениях радиационного баланса в любое время суток. Также в редких случаях отмечаются значения, составляющие 10–60% от значений радиационного баланса. В остальное время за редким исключением доля тепла, затрачиваемая на испарение, не превышает 1–5%.

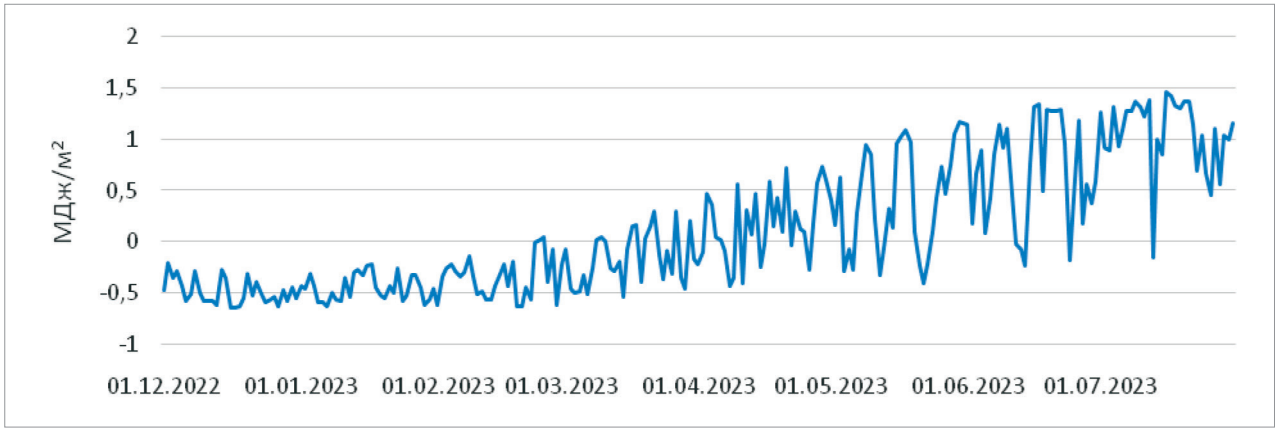


Рисунок 4.13. Затраты тепла на испарение за сутки на открытом участке в период с 1 декабря 2022 г. по 31 июля 2023 г.

4.2.1.3. Турбулентный поток тепла

Турбулентный теплообмен подстилающей поверхности с атмосферой возникает за счет неодинакового прогрева подстилающей поверхности и прилегающего к ней слоя атмосферы. Характер его изменений аналогичен радиационному балансу и затратам тепла на испарение, происходят колебания значений с общим трендом на увеличение к летнему периоду (рисунок 4.14). По отношению к значениям радиационного баланса выделяются три ситуации. В первой при положительных значениях радиации фиксируются отрицательные значения турбулентного потока, демонстрирующие охлаждение, данная ситуация отмечается в период конец апреля – начало мая ранним утром. Вторая ситуация характеризуется значительным превышением значений турбулентного потока над радиацией 120–300%, что наблюдается для отрицательных потоков, направленных на охлаждение, преимущественно в первой половине дня. Закономерности по сезонам и времени суток не наблюдается. Описанные выше две ситуации являются крайне редким явлением, и в третьей ситуации преобладающее количество значений турбулентного потока составляют около 90–100% от радиационного баланса, что демонстрирует основное направление расходования поступающей в ландшафт энергии.

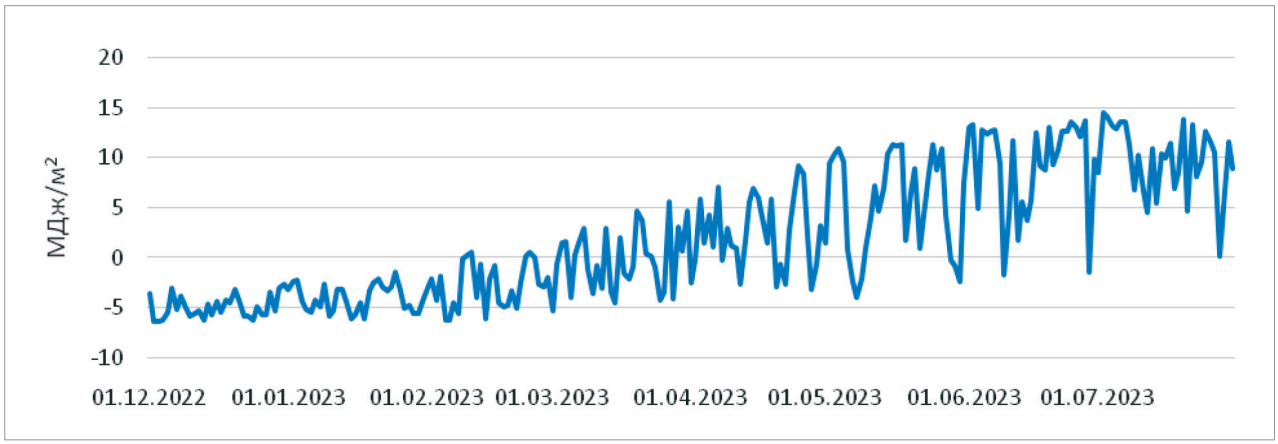


Рисунок 4.14. Турбулентный поток тепла за сутки на открытом участке в период с 1 декабря 2022 г. по 31 июля 2023 г.

4.2.1.4. Поток тепла в почве

Поток тепла в почве характеризует изменение температуры почвы с глубиной. В отличие от остальных элементов теплового баланса не имеет тренда на общий рост значений, отмечается лишь попеременный нагрев и остывание почвенного слоя (рисунок 4.15). Противоположное значение по отношению к радиационному балансу поток тепла в почве принимает в ночное и утреннее время до полудня в зимний период, в марте время сдвигается на ранее утро с отрицательными значениями радиации и положительными потока в почве и день с обратной ситуацией. Аналогично в весенне-летний период, однако он более стабилен по времени. Значения теплового потока крайне редко составляют более 40% от значения радиационного баланса, в большинстве случаев их доля составляет не более 10%.

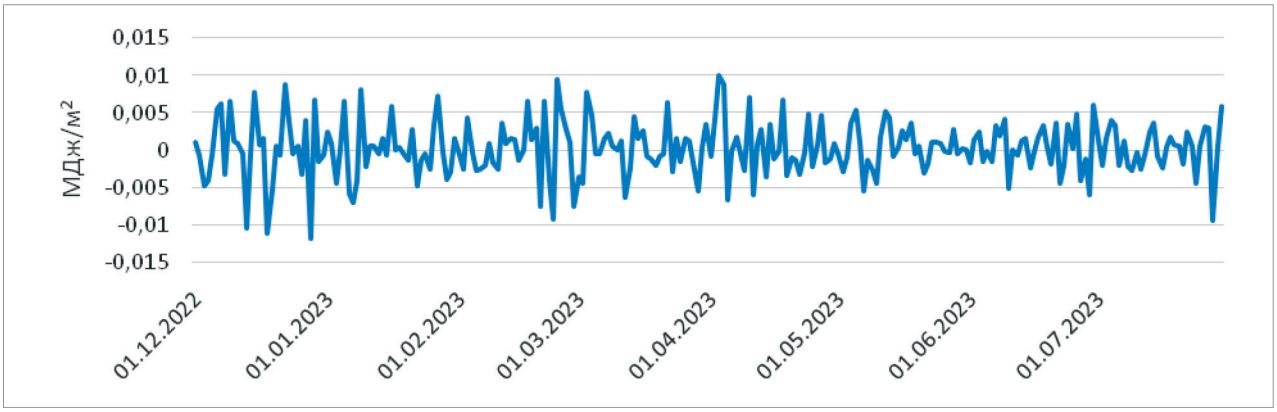


Рисунок 4.15. Поток тепла в почве за сутки на открытом участке в период с 1 декабря 2022 г. по 31 июля 2023 г.

4.2.2. Тепловой баланс пушистодубового леса

Описанные выше значения элементов теплового баланса относятся к открытому горизонтальному участку без учета растительного покрова. Для пушистодубового леса, как леса с лиственными породами деревьев, характерно сезонное изменение количества листвы в кроне, вплоть до ее отсутствия в зимний период. Таким образом, для рассматриваемого нами периода выделяются три фазы роста кроны для описания их состояния и особенностей задержания ими поступающей радиации: отсутствие листвы в зимний период, начало вегетации в весенний период и состояние максимального развития кроны с конца весны и летом. Так как подпологовое пространство имеет сложную мозаичную структуру и для каждой точки наблюдений характерны свои значения поступающей солнечной радиации, в расчетах использовались осредненные дневные значения пропускания для рассмотрения лесного сообщества в целом.

4.2.2.1. Радиационный баланс

Для зимнего периода среднее значение пропускания солнечной радиации пологом составляет 43,2%. Данное значение характерно для всего зимнего периода и захватывает начало мая. При рассмотрении равнинного участка зимнего леса в ясную солнечную погоду фиксируются значения пропускания до 90%, однако данные значения являются идеализированными и не учитывают особенности территории. Для изучаемой территории характерны частые туманы и облачность в зимний период, горный рельеф местности способствует формированию теней от склонов, а также на участке на некоторых ветвях деревьев отмечается неопавшая листва. Все перечисленные факторы влияют на количество поступления солнечной радиации под полог (рисунки 4.18. 4.19).

Рисунок 4.16. Распределение суммарной солнечной радиации в период отсутствия листвы

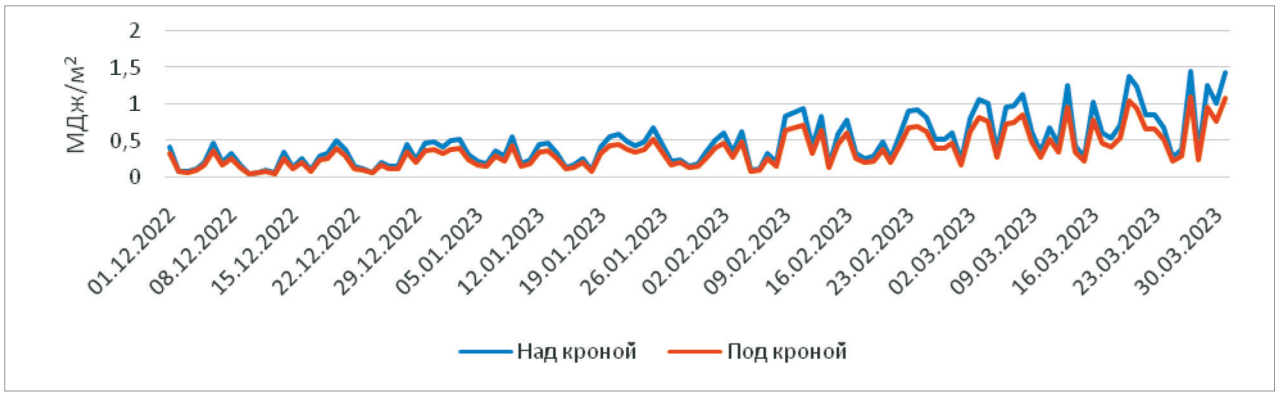


Рисунок 4.17. Распределение отраженной солнечной радиации в период отсутствия листвы

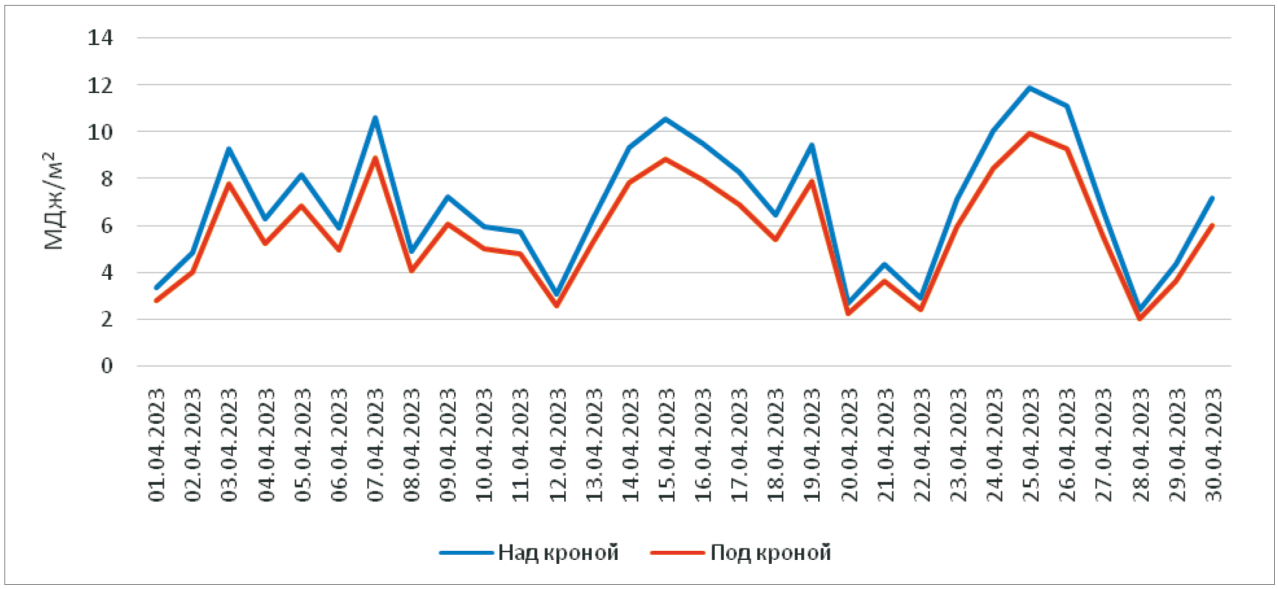


Рисунок 4.18. Распределение суммарной солнечной радиации в период начала вегетации

Период начала вегетации протекает с марта по апрель, и значение пропускания солнечной радиации пологом составляет 45,6% (рисунки 4.18, 4.19). Для большего временного периода данное значение составляет более 50%, однако в вечернее время за счет теней, увеличенных из-за склона, оно значительно снижается. С мая и весь летний период крона находится в состоянии своего полного развития и пропускает в среднем только 19,1% солнечной радиации (рисунки 4.20, 4.21). Завышенные значения отмечаются в полдень, а в остальное время значения пропускания ниже средних.

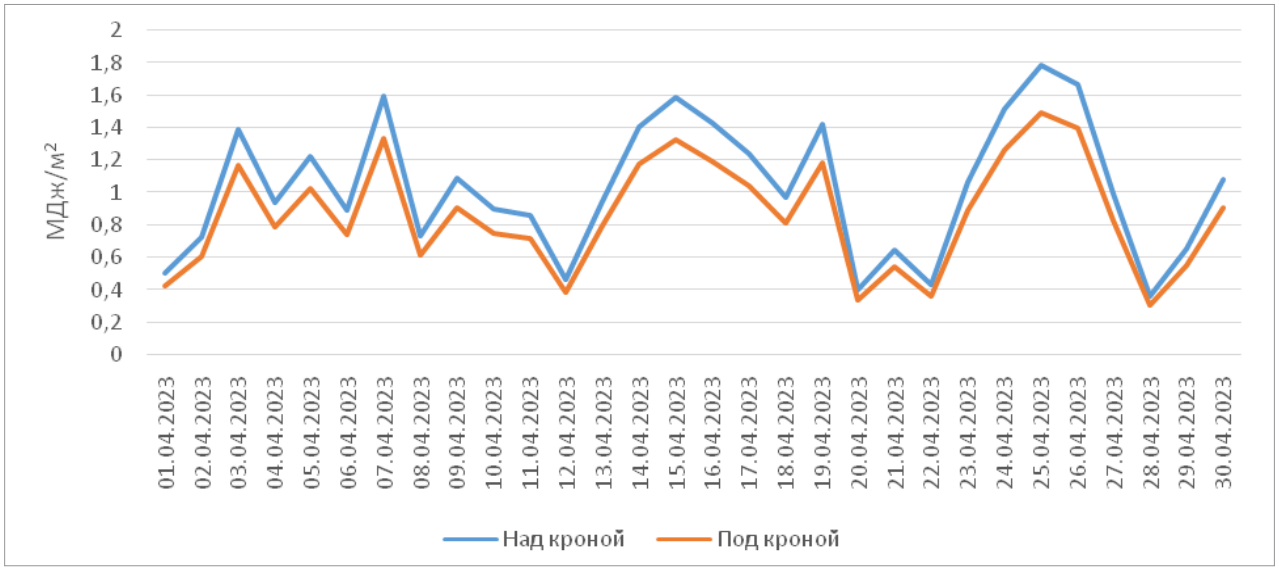


Рисунок 4.19. Распределение отраженной солнечной радиации в период начала вегетации

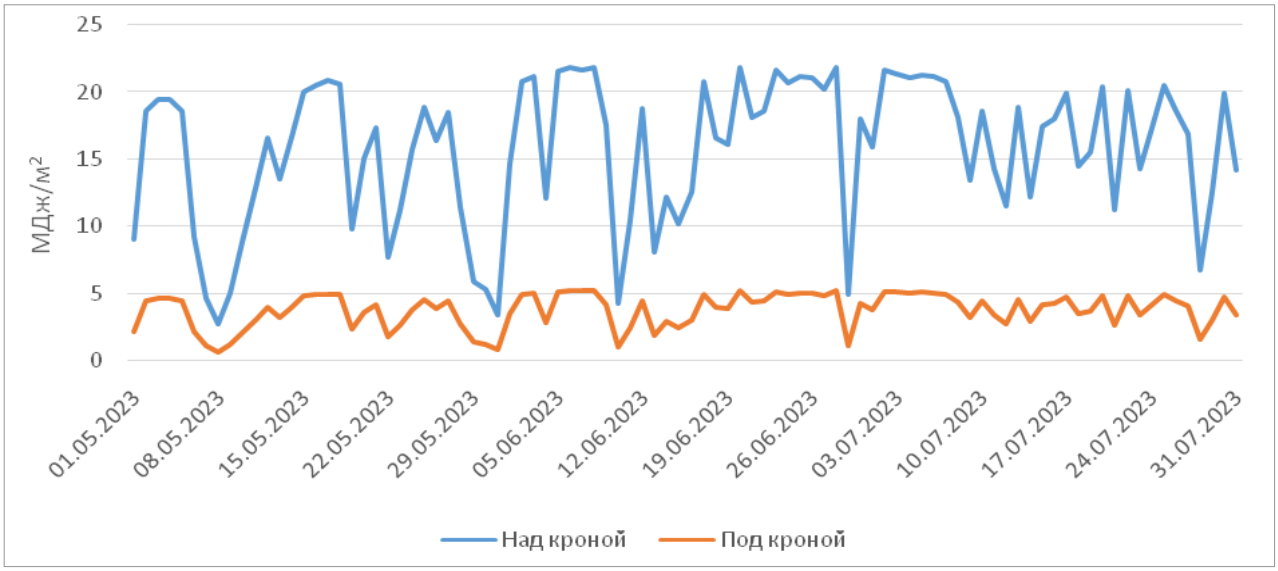


Рисунок 4.20. Распределение суммарной солнечной радиации в период полной вегетации

Данное распределение солнечной радиации между подпологовым пространством и поверхностью кроны определяет итоговые значения баланса под кроной, в котором в конце весны вместе с процессом развития кроны деревьев резко снижаются значения радиационного баланса (рисунок 4.22).

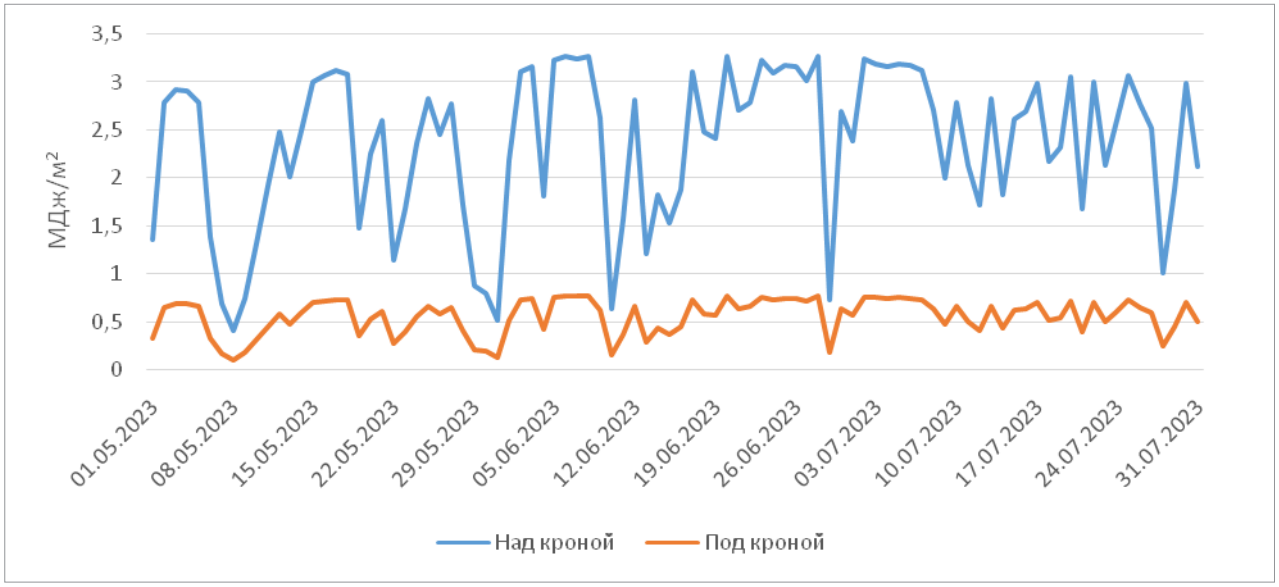


Рисунок 4.21. Распределение отраженной солнечной радиации в период полной вегетации

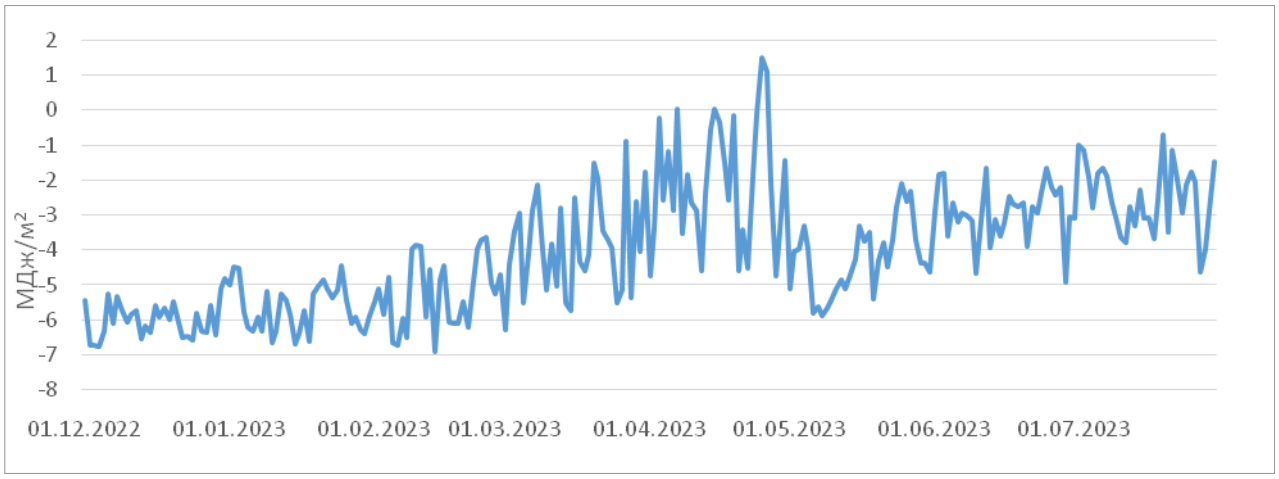


Рисунок 4.22. Радиационный баланс за сутки под кроной в период с 1 декабря 2022 г. по 31 июля 2023 г.

На открытом участке вся суммарная солнечная радиация участвует в распределении потоков тепла, однако в лесном сообществе она делится на две области: над кроной и под кроной, которые формируют собственные потоки относительно независимо друг от друга.

4.2.2.2. Затраты тепла на испарение

При рассмотрении значений затрат тепла на испарение под кроной отмечаются отрицательные значения, демонстрирующие преобладание конденсации над испарением. Это объясняется характерной для зимнего периода пасмурной погодой и образованием тумана. В весенний период рассматриваемый показатель заметно возрастает (рисунок 4.23).

В зимний период отмечается наибольшая амплитуда значений затрат тепла на испарение, которая составляет около 0,66 МДж/м^2 при перепадах значений от 0 до –0,66 МДж/м^2. К концу зимы – началу весны амплитуда уменьшается до 0,45 МДж/м^2. В весенний период при увеличении показателя перепад значений сохраняется.

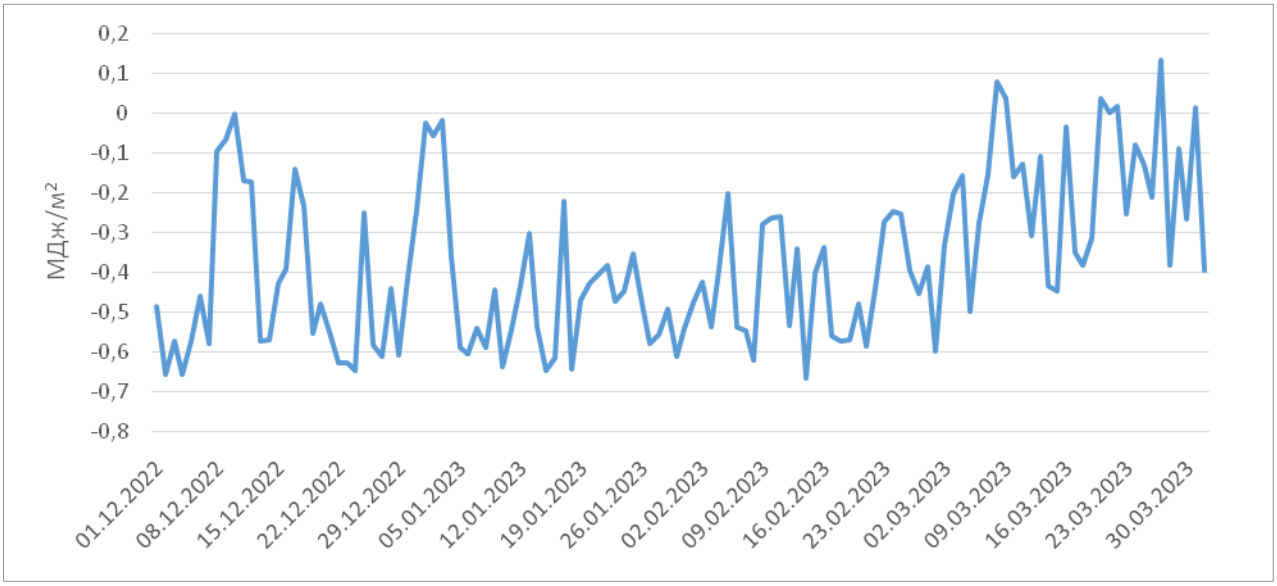


Рисунок 4.23. Затраты тепла на испарение под кроной

4.2.2.3. Турбулентный поток тепла

Аналогичная открытому участку в зоне произрастания пушистодубового леса ситуация наблюдается и при рассмотрении турбулентного потока тепла под пологом леса. Отрицательные значения турбулентного потока зимой постепенно возрастают к апрелю (рисунок 4.24).

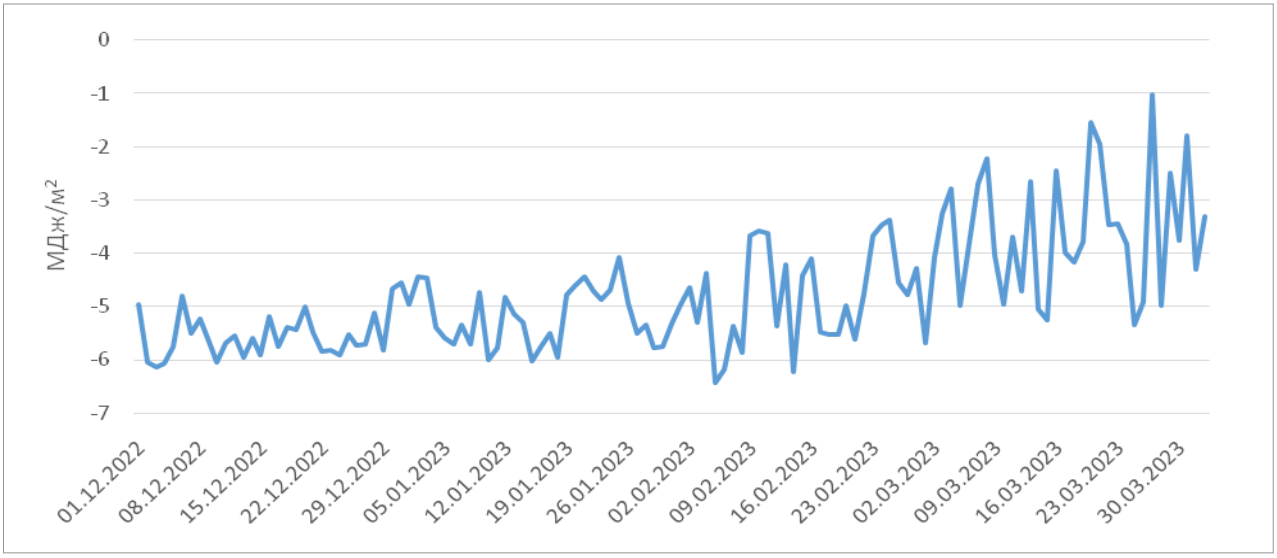


Рисунок 4.24. Турбулентный поток тепла под кроной

В зимний период значения колеблются около –5,5 МДж/м^2 и начинают возрастать к концу зимнего периода. В течение марта происходит заметное увеличение потока тепла и амплитуды его изменений.

4.2.2.4. Поток тепла в почве

Поток тепла в почве так же, как и на открытом участке, характеризуется равномерным чередованием нагрева и остывания слоя почвы в том же диапазоне значений (рисунок 4.25).

Несмотря на неполый ряд данных, на основании выявленных ранее закономерностей можно предположить ход дальнейшего изменения значений элементов теплового баланса. Поток тепла в почве аналогично открытому участку сохранит колебания значений около нуля с уменьшением их амплитуды в летний период. В то же время затраты тепла на испарение и турбулентный поток тепла имеют аналогичный радиационному балансу характер изменения, что позволяет спрогнозировать их постепенный рост до мая и резкий спад значений при достижении кроной полного ее развития.

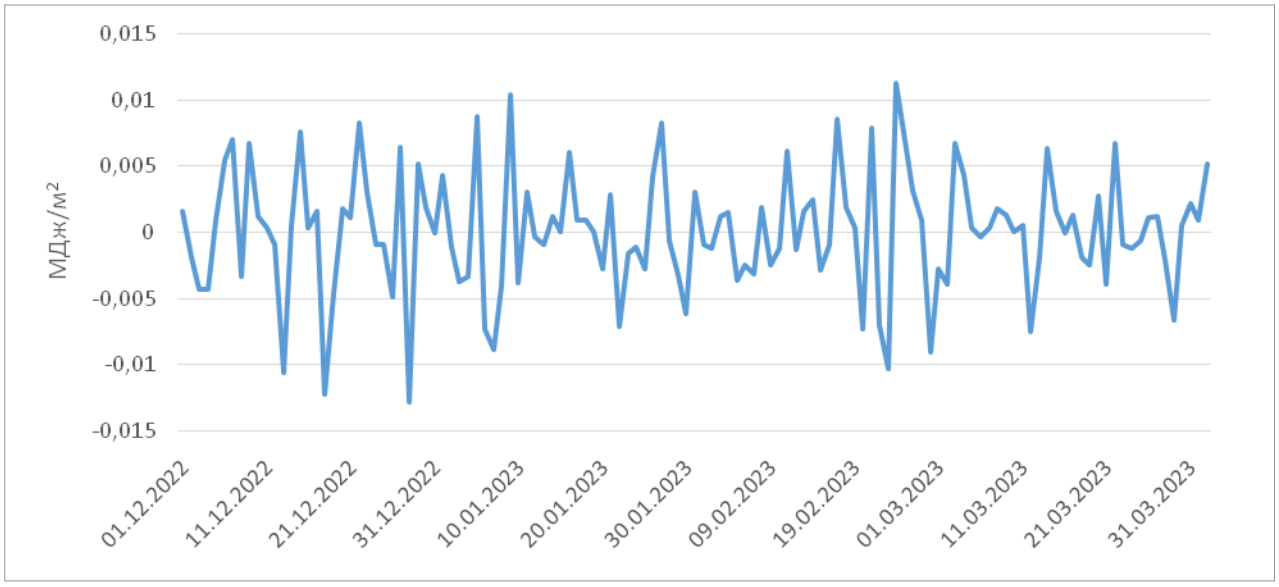


Рисунок 4.25. Поток тепла в почве под кроной

4.2.2.5. Связь температуры воздуха с основными элементами теплового баланса

Стоит рассмотреть дополнительно изменение хода температуры как основной характеристики тепла на открытом участке и под пологом леса. Согласно рисункам 4.26 и 4.27, среднесуточная температура воздуха в лесу в рассматриваемый период всегда выше температуры на открытом участке. В зимний период разница не существенна, но с постепенным развитием кроны становится более заметным ее влияние на сохранение тепла в подпологовом пространстве. Летом ситуация аналогичная за счет сохранения накопленного днем тепла ночью и ранним утром, в отличие от открытого участка.

При рассмотрении изменения температуры в рамках суточных значений отмечается, что в зимний период превышение значений в лесу составляет около 0,1°С, а в полдень данное значение могло подниматься от 0,7°С до 6°С в отдельные часы. В марте ночная разница составляет 0,1–0,5°С, в период 8–15 часов разница могла достигать 3°С, а в полдень максимальная разница достигала 10°С. В весенне-летний период в отдельные часы разница также могла достигать 4–10°С. Превышение температуры воздуха на открытым участке над значениями в лесном сообществе зафиксированы на протяжении всего рассматриваемого периода. Как правило, разница составляла не более 1°С в ночное время и ранним утром.

Среднесуточные значения температуры почвы демонстрируют сохранение тепла пологом леса в зимний период, в марте значения выравниваются, и с началом вегетационного периода отмечается снижение температуры в лесном участке (рисунки 4.28, 4.29).

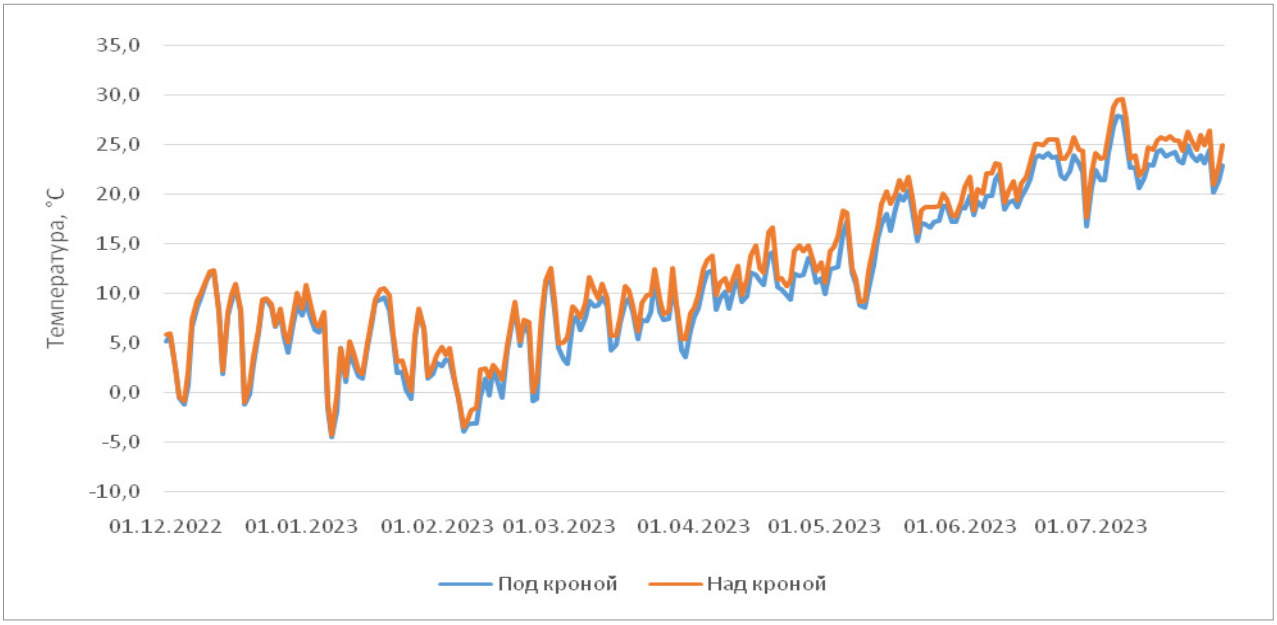


Рисунок 4.26. Температура воздуха на открытом участке и под пологом пушистодубового леса

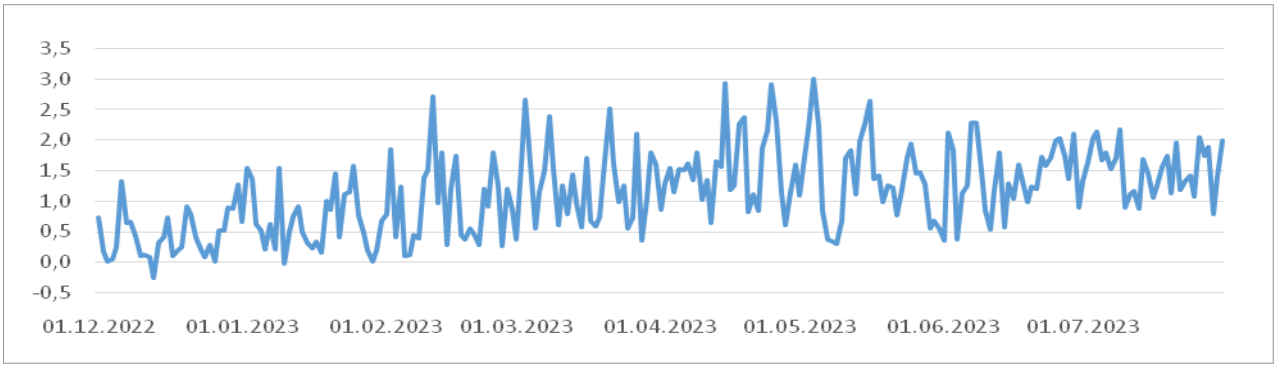


Рисунок 4.27. Разница температур воздуха между открытым участком и под пологом пушистодубового леса

Рисунок 4.28. Температура почвы на открытом участке и под пологом пушистодубового леса

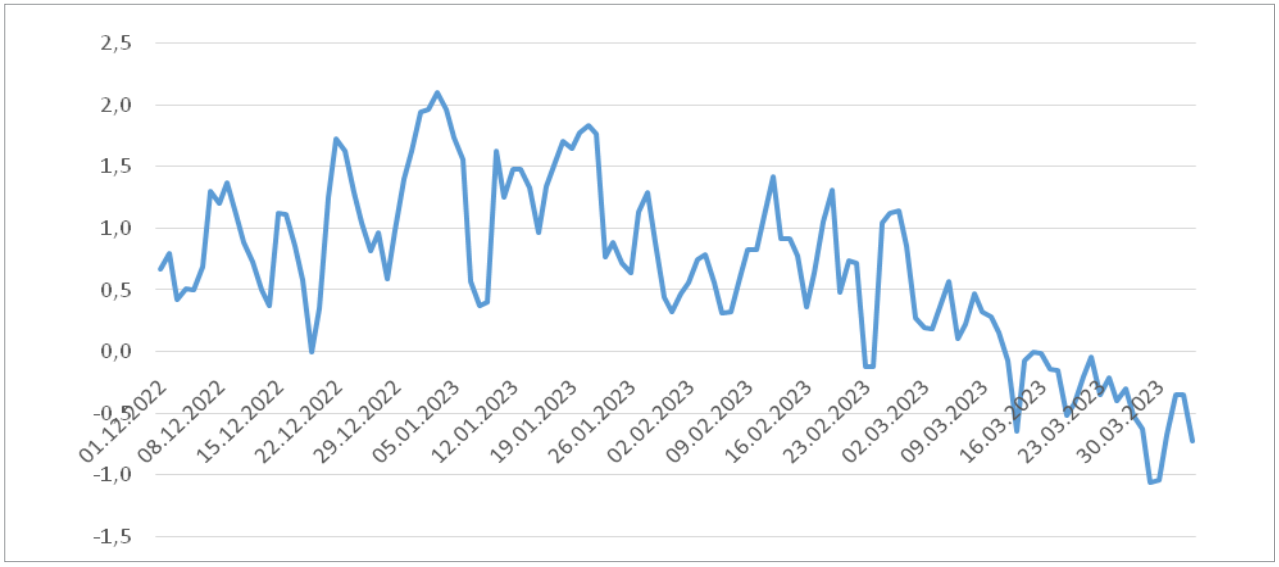


Рисунок 4.29. Разница температур почвы под пологом пушистодубового леса и на открытом участке

Разница температур почвы между открытым участком и лесом более равномерная по сравнению со значениями воздуха и не имеет резких перепадов. В зимний и весенний период в среднем разница составляет 1°С, максимум – 2,7°С. В редких случаях в ночное время температура открытого участка может превышать значения в лесу около 0,2°С.

В летний период, в условиях тени под кроной, температура почвы снижается и в ночное время имеет разницу с открытым участком 2–3°С, а днём быть меньше на 7–8°С.

При рассмотрении зависимости основных элементов теплового баланса от температуры наблюдается общая закономерность, при которой рост температуры фиксируется при увеличении значений радиационного баланса, затрат тепла на испарение и турбулентный обмен (рисунки 4.30–4.35). Для теплового потока в почве данная закономерность не наблюдается.

Несмотря на общую закономерность распределения значений на открытом участке и на территории пушистодубового леса, выделяется ситуация в лесу, где отношение температуры воздуха к основным элементам теплового баланса значительно слабее, чем на открытом участке. Это в свою очередь демонстрирует более сложную организацию рассматриваемого ландшафта и распределения в нём потоков тепла и энергии.

4.2.3. Тепловой баланс открытого участка в пределах можжевелового леса

4.2.3.1. Радиационныйбаланс

Благодаря полученным в ходе мониторинговых измерений данным прослеживаются основные тенденции изменения радиационного баланса и его распределения по сезонам. В осенне-зимний период происходит постепенное уменьшение значений радиационного баланса (рисунок 4.36а). Осенью отмечаются попеременно положительные и отрицательные значения баланса, а зимой – только отрицательные. Обратно осенним, весенние изменения значений характеризуются постепенным увеличением положительных значений радиационного баланса (рисунок 4.36б). В летний период наблюдаются стабильно высокие значения суточного баланса, который начинает уменьшаться к осеннему сезону (рисунок 4.36в).

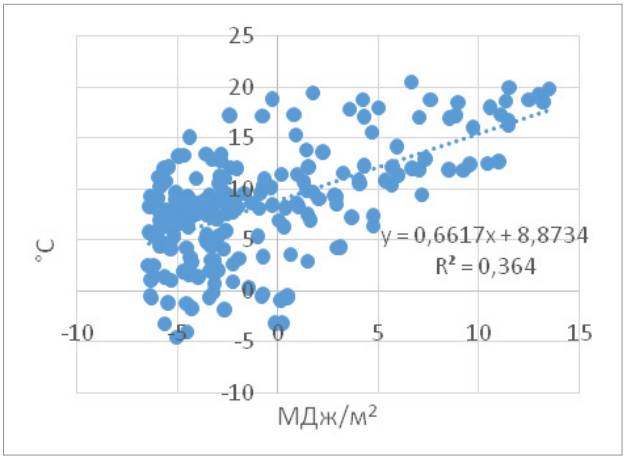


Рисунок 4.30. Связь значений температуры воздуха и радиационного баланса на открытом участке

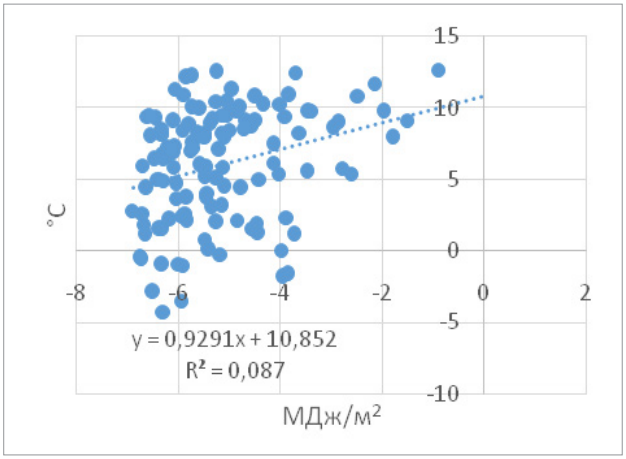


Рисунок 4.31. Связь значений температуры воздуха и радиационного баланса под пологом леса

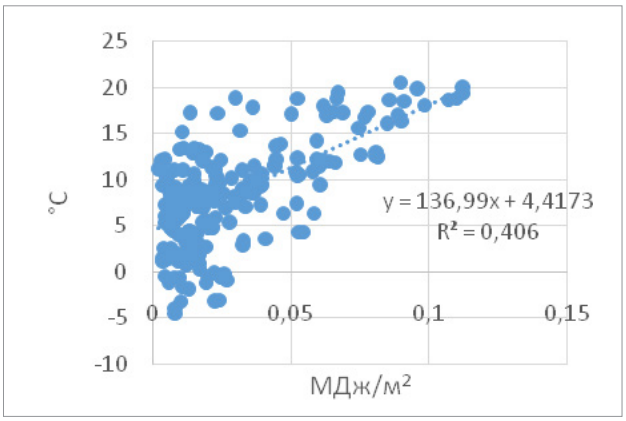


Рисунок 4.32. Связь значений температуры воздуха и затрат тепла на испарение на открытом участке

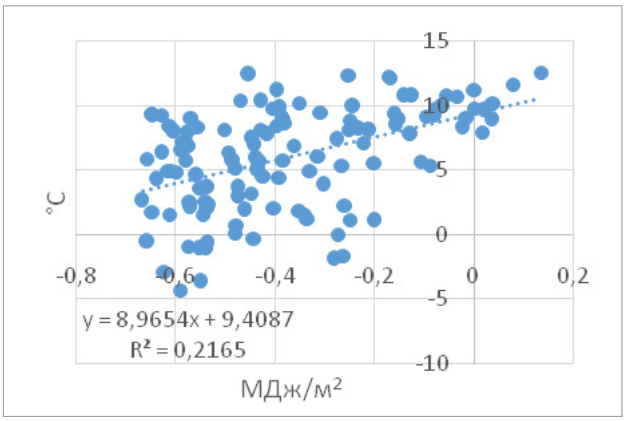


Рисунок 4.33. Связь значений температуры воздуха и затрат тепла на испарение под пологом леса

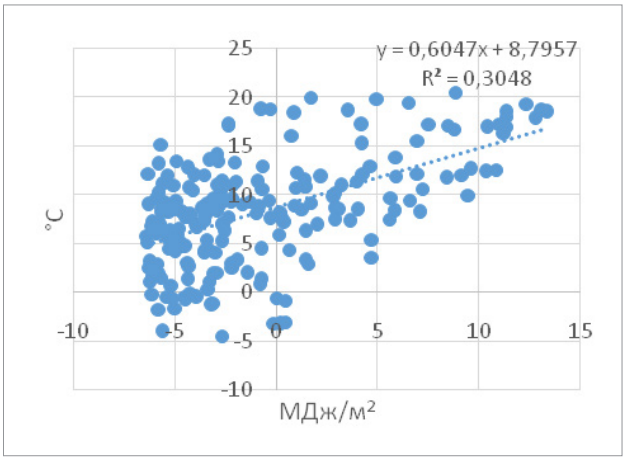


Рисунок 4.34. Связь значений температуры воздуха и турбулентного потока на открытом участке

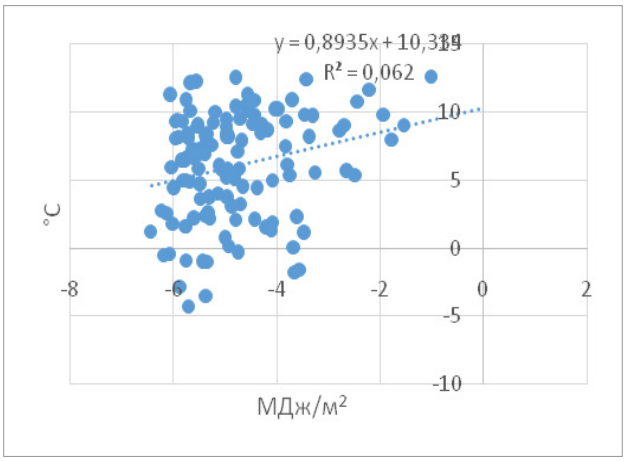
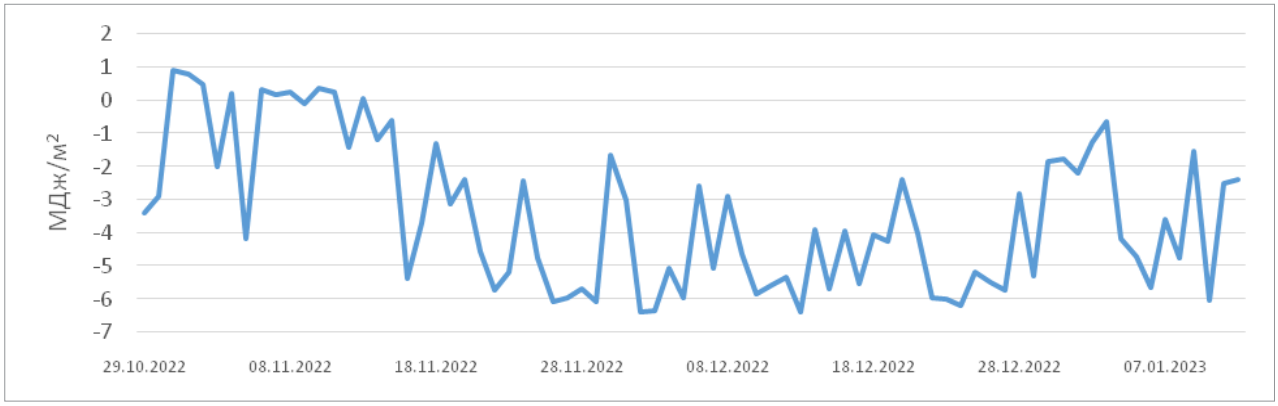
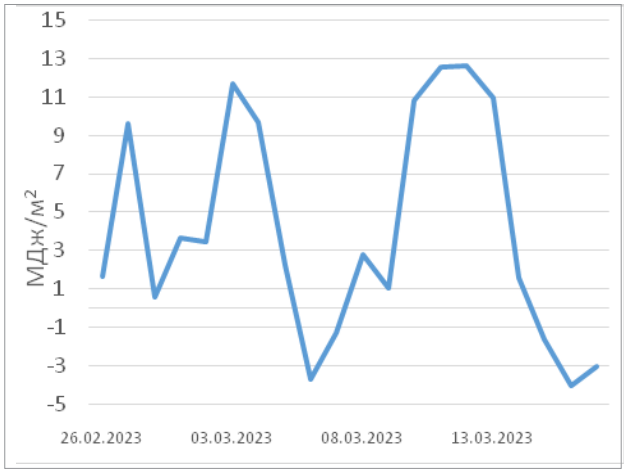


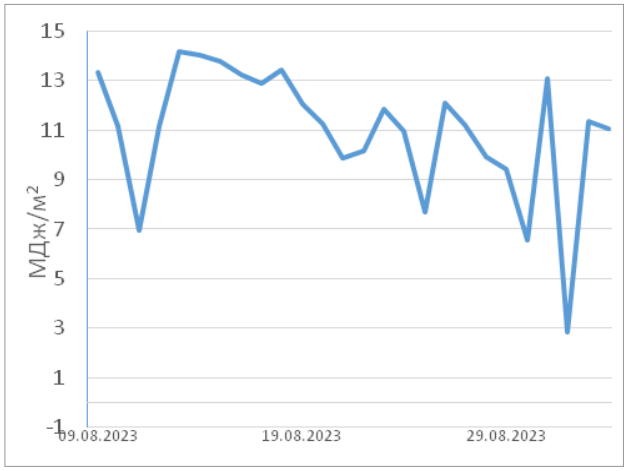
Рисунок 4.35. Связь значений температуры воздуха и турбулентного потока под пологом леса



а)



б)



в)

Рисунок 4.36. Радиационный баланс за сутки на открытом участке:
а) в осенне-зимний период с 29 октября 2022 года по 13 января 2023 года;
б) в зимне-весенний период с 25 февраля по 18 марта 2023 года;
в) в летний период с 8 августа по 4 сентября 2023 года.

При рассмотрении суточных изменений значений радиационного баланса в зимний, весенний и летний периоды отмечаются закономерно положительные величины в дневное время и отрицательные в ночное (рисунок 4.37). В зимний период за счёт короткого светового дня и небольшой высоты солнца над горизонтом наблюдается снижение положительных значений баланса, при этом в весенний период из-за частых туманов и облачности происходит значительное снижение поступления солнечной радиации. В условиях ясного неба с увеличением светового дня и положения солнца весной происходит рост как значений положительного радиационного баланса, так и его продолжительность, максимальное количество поступления солнечной радиации происходит в летнее время.

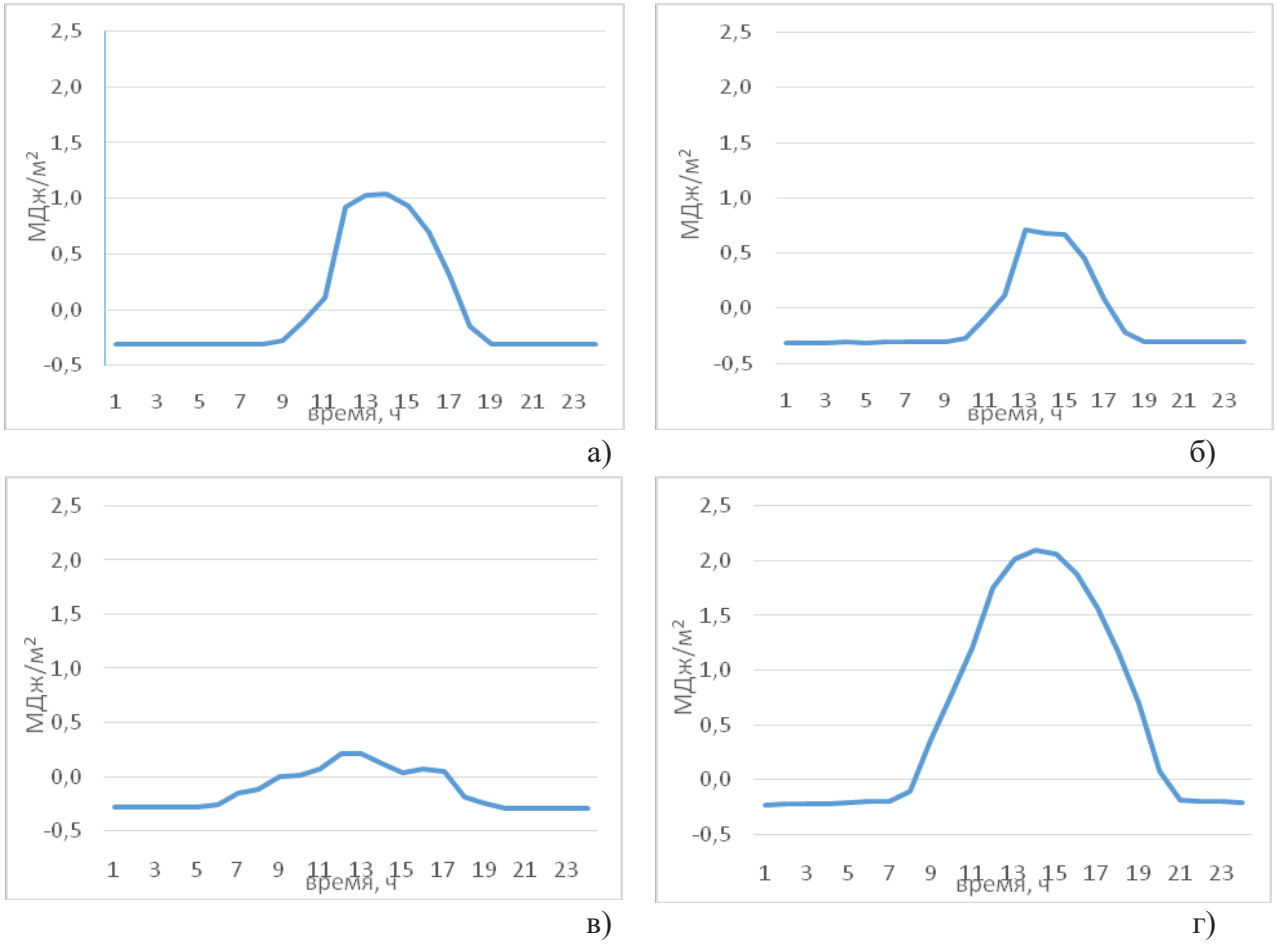


Рисунок 4.37. Радиационный баланс открытого участка на примере: а) 8 ноября 2022 года; б) 12 января 2023 года; в) 18 марта 2023 года; г) 9 августа 2023 года.

Дальнейшее распределение значений радиационного баланса на затраты тепла на испарение, вертикальный турбулентный теплообмен и поток тепла в почвенном слое формирует тепловой баланс внутри ландшафта.

4.2.3.2. Затраты тепла на испарение

Распределение значений затрат тепла на испарение происходит аналогично радиационному балансу (рисунок 4.38).

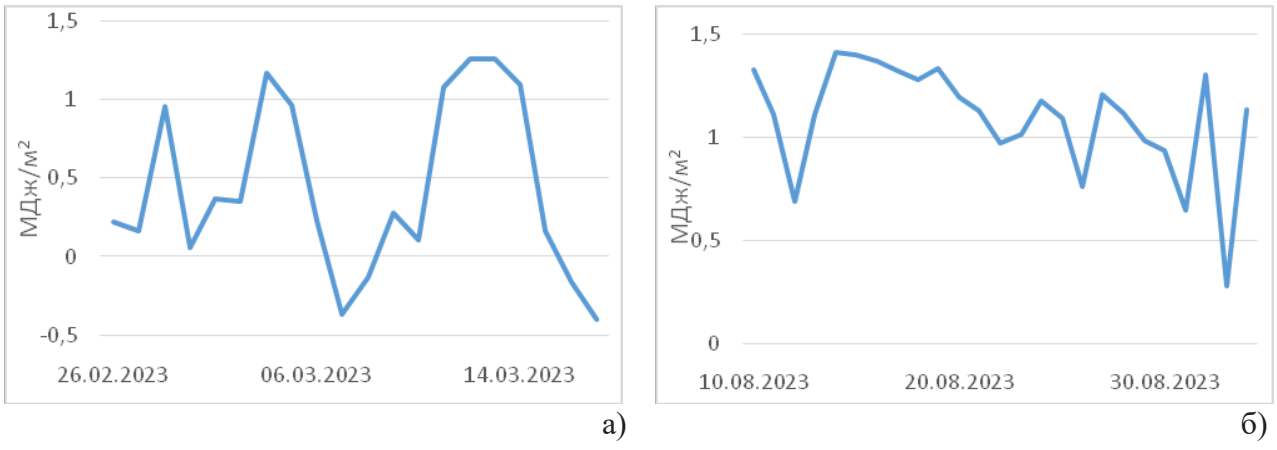


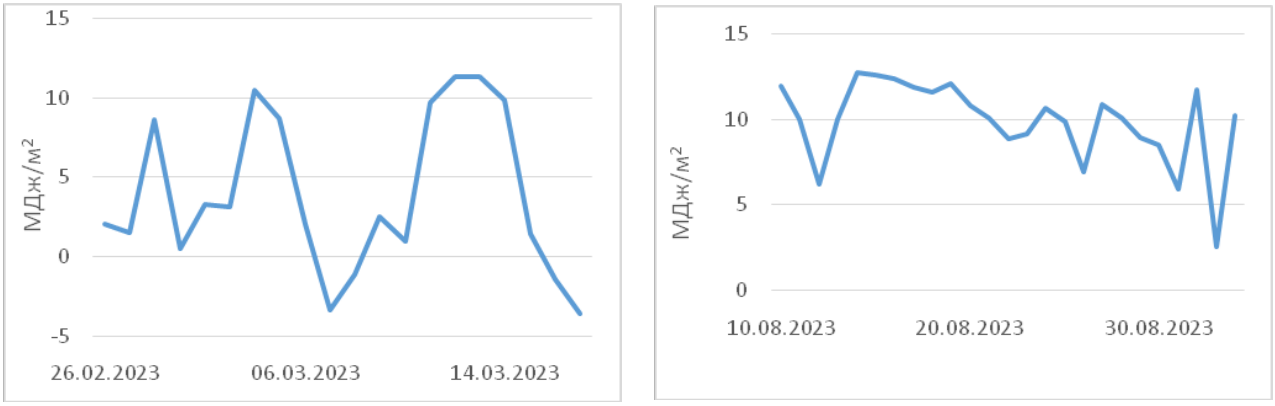
Рисунок 4.38. Затраты тепла на испарение за сутки на открытом участке: а) в период с 25 февраля по 18 марта 2023 года; б) в период с 8 августа по 4 сентября 2023 года.

В соответствии с изменением поступления солнечной радиации, при ее увеличении с зимнего по летний период, происходит увеличение расхода энергии на испарение. В процентном соотношении затраты тепла на испарение к радиационному балансу составляют около 10% с небольшими колебаниями. На исследуемой территории отрицательные значения радиационного баланса всегда соответствуют процессу конденсации, а положительные – испарению.

4.2.3.3. Турбулентный поток тепла

Неравномерный прогрев подстилающей поверхности и прилегающего к нему слоя атмосферы образует турбулентный теплообмен. Характер его изменений аналогичен радиационному балансу и затратам тепла на испарение, неравномерные значения с общим трендом на увеличение с зимнего по летний период и уменьшение осенью (рисунок 4.39). Преобладающее количество значений турбулентного потока составляют около 90% от радиационного баланса, как основное направление расходования поступающей в ландшафт энергии.

При рассмотрении зимне-весеннего периода отмечается увеличение значений турбулентного потока тепла с увеличением разброса значений при сохранении среднего значения около 5 МДж/м^2. В летний период фиксируются стабильно высокие значения около 10 МДж/м^{2}с небольшим уменьшением к осеннему периоду.



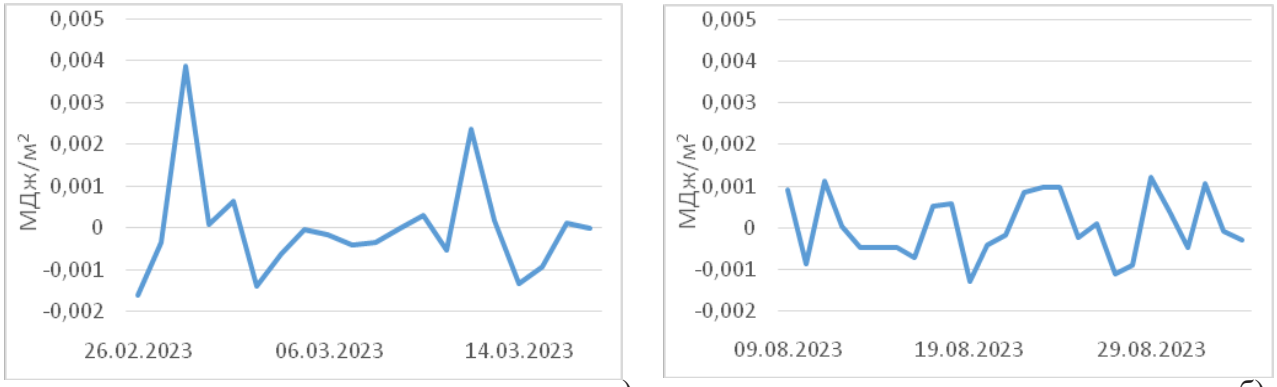
а) б)

Рисунок 4.39. Турбулентный поток тепла за сутки на открытом участке: а) в период с 25 февраля по 18 марта 2023 года; б) в период с 8 августа по 4 сентября 2023 года.

4.2.3.4. Поток тепла в почве

Поток тепла в почве в отличие от остальных элементов теплового баланса не имеет четкого тренда на увеличение или снижение при смене сезонов, происходит только попеременный нагрев и остывание почвенного слоя (рисунок 4.40). В утреннее время поток тепла в почве обычно принимает противоположное значение по отношению к радиационному балансу. По отношению к радиационному балансу доля теплового потока в почве в большинстве случаев составляет около 1%, за редким исключением достигая 10%.

Аналогично участку в пушистодубовом лесу значения потока тепла в почве изменяются около нулевого значения с изменением перепадов значений в течение года.



а) б)

Рисунок 4.40. Поток тепла в почве за сутки на открытом участке: а) в период с 25 февраля по 18 марта 2023 года; б) в период с 8 августа по 4 сентября 2023 года.

4.2.4. Тепловой баланс можжевелового леса

Описанные выше значения элементов теплового баланса относятся к открытому горизонтальному участку без учета растительного покрова. Можжевеловый лес, произрастающий на территории ключевого участка, формирует собственный кроновый рельеф, при этом для хвойных пород деревьев характерно постоянное состояние крон круглый год. Также на рассматриваемом участке точечно встречаются лиственные породы, которые имеют сезонные изменения количества листвы в кроне. Таким образом, основными факторами, в равной степени влияющими на поступление солнечной радиации, являются положение солнца относительно поверхности, особенности рельефа, формирующие дополнительные теневые участки, и изменение состояния крон лиственных пород.

4.2.4.1. Радиационный баланс

Для зимнего периода среднее значение пропускания солнечной радиации пологом составляет 30,4%. В отличие от лиственного леса можжевеловый не имеет цельного сомкнутого полога, каждое дерево по отдельности формирует теневые участки, что в совокупности с горным рельефом местности создает сложный теневой рисунок, сильно изменяющийся во времени. Все перечисленные факторы влияют на количество поступления солнечной радиации под полог (рисунки 4.41, 4.42).

Рисунок 4.41. Распределение суммарной солнечной радиации в осенне-зимний период

Рисунок 4.42. Распределение отраженной солнечной радиации в осенне-зимний период

Период начала вегетации лиственных пород протекает с марта по апрель, при этом доля пропускания сохраняет крайне неравномерный характер распределения по площади. В среднем значение пропускания солнечной радиации пологом в весенний период составляет 26,7% (рисунки 4.43, 4.44). Существенное влияние в рассматриваемые сезоны оказывает тень от скал в утренние и вечерние часы, за счёт чего происходит снижение доли поступающей солнечной радиации под полог.

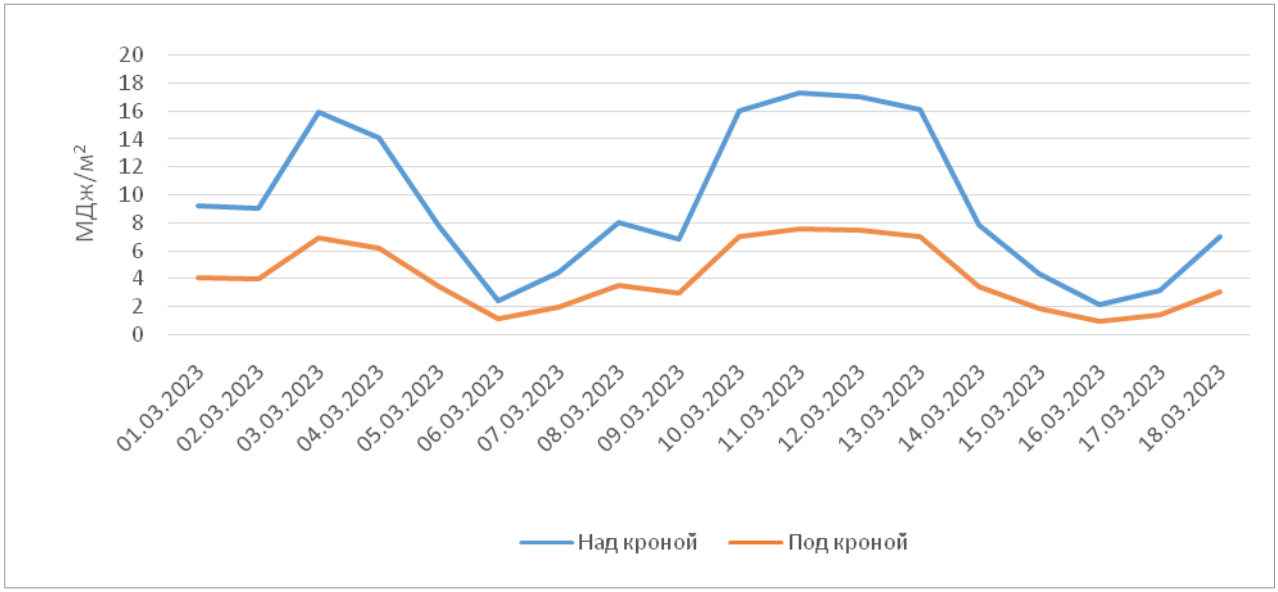


Рисунок 4.43. Распределение суммарной солнечной радиации в весенний период

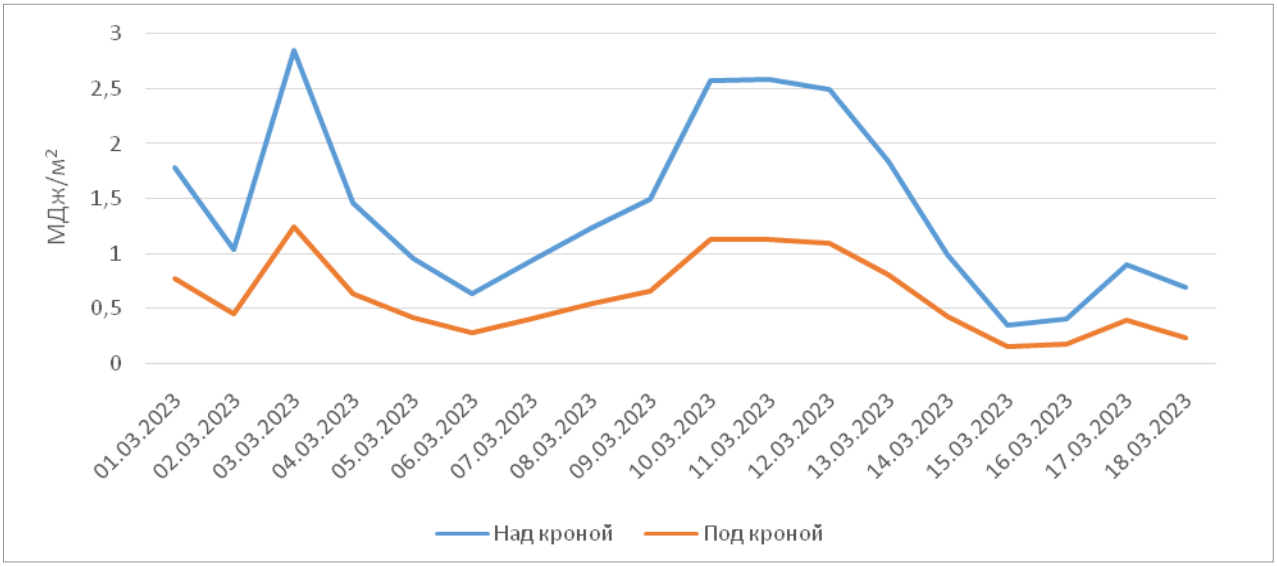


Рисунок 4.44. Распределение отраженной солнечной радиации в весенний период

В летний период наблюдается более стабильная картина пропускания, где большая часть измерений фиксирует значения пропускания около 10% за редким исключением, в среднем только 18,6% солнечной радиации поступает под крону (рисунки 4.45, 4.46). Завышенные значения отмечаются в каждый период наблюдений в зависимости от положения солнца к точке измерений.

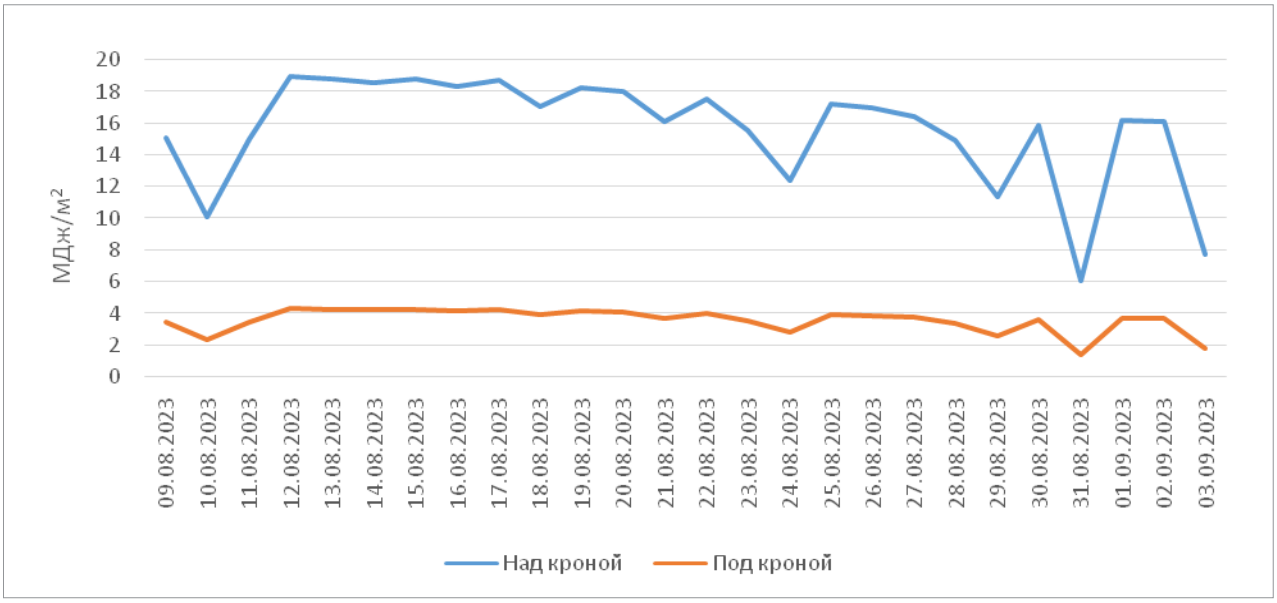


Рисунок 4.45. Распределение суммарной солнечной радиации в летний период

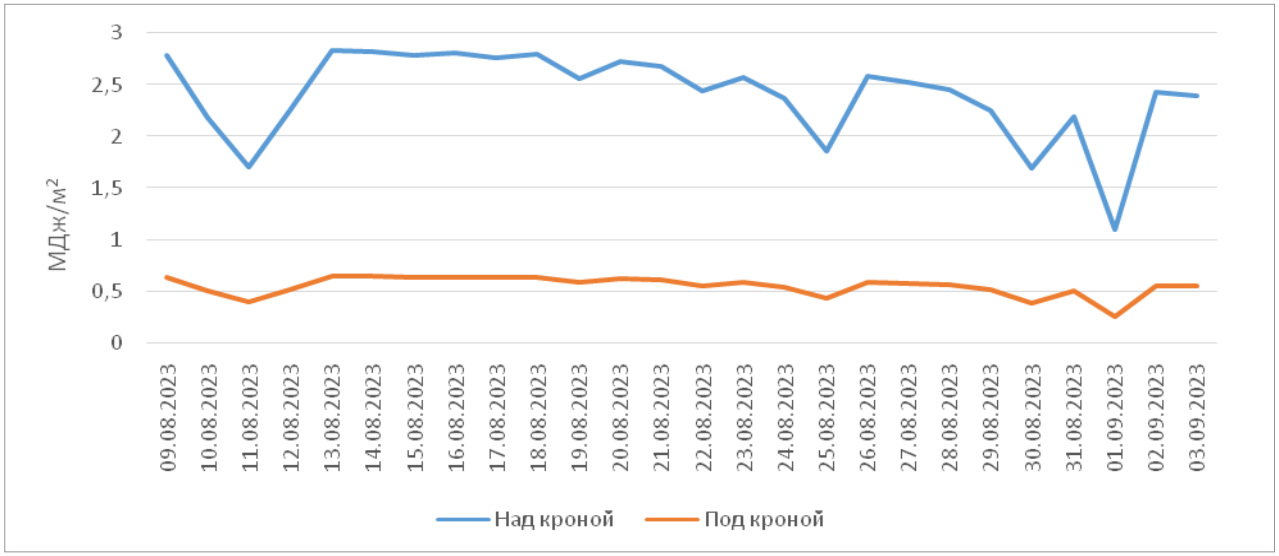
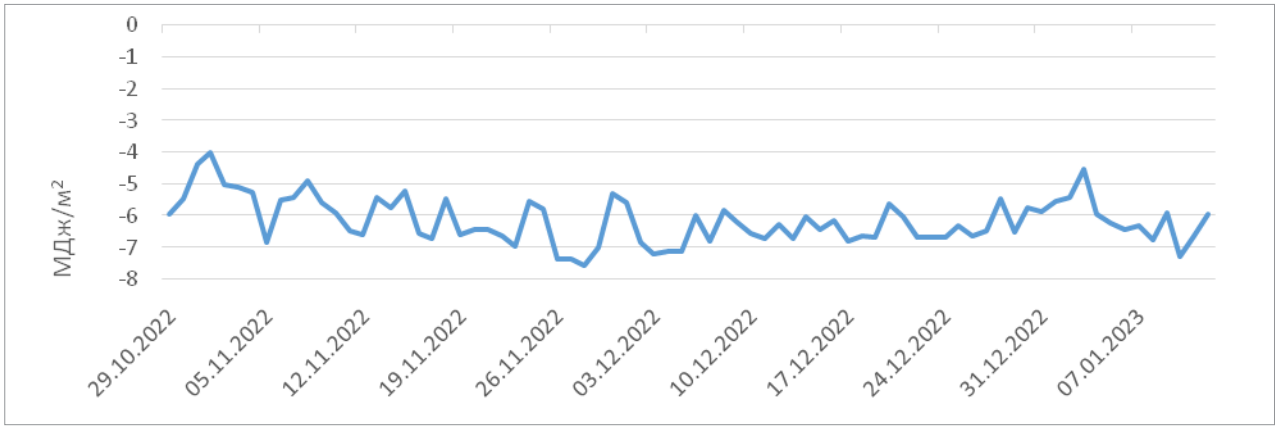
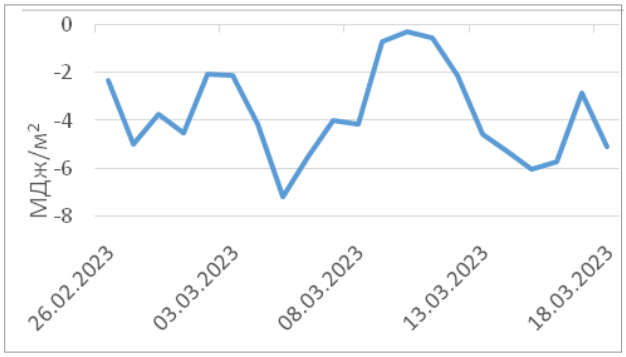


Рисунок 4.46. Распределение отраженной солнечной радиации в летний период

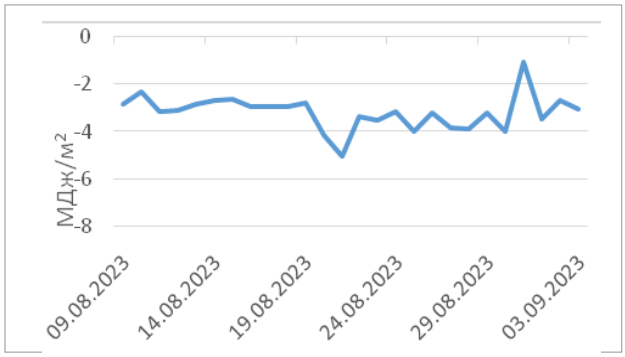
Данное распределение солнечной радиации между подпологовым пространством и поверхностью кроны определяет итоговые значения баланса под кроной, в котором в течение всего года наблюдаются отрицательные значения (рисунок 4.47). Наименьшие значения закономерно наблюдаются зимой, переходный период с резкими перепадами весной, и относительно стабильные значения летом.



а)



б)

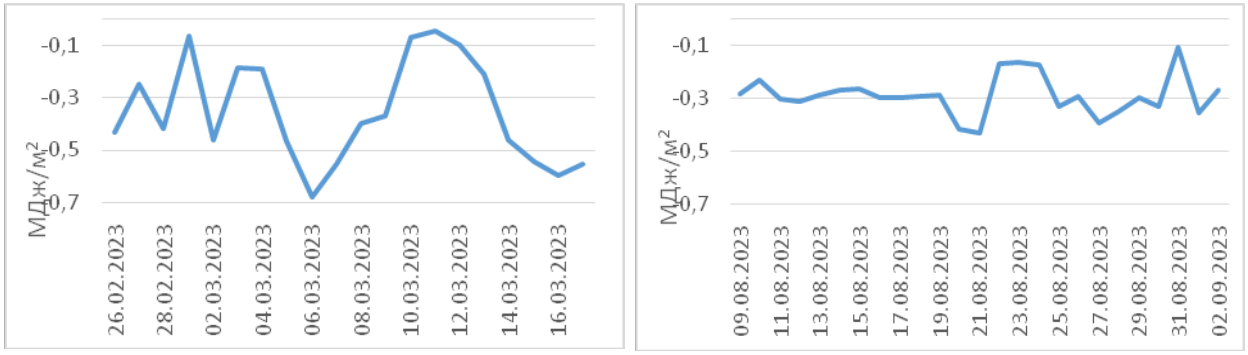


в)

Рисунок 4.47. Радиационный баланс за сутки под кроной:
а) в осенне-зимний период; б) в весенний период; в) в летний период

4.2.4.2. Затраты тепла на испарение

При рассмотрении значений затрат тепла на испарение под кроной отмечаются отрицательные значения, демонстрирующие преобладание конденсации над испарением. Это объясняется характерной для весеннего периода пасмурной погодой и образованием тумана. Также стоит отметить прибрежное положение территории и наличие бризов, которые приносят воздушные массы, повышающие относительную влажность и понижающие температуру, что оказывает влияние на расчетные значения испарения, снижая их. В летний период рассматриваемый показатель имеет более равномерный характер (рисунок 4.48).

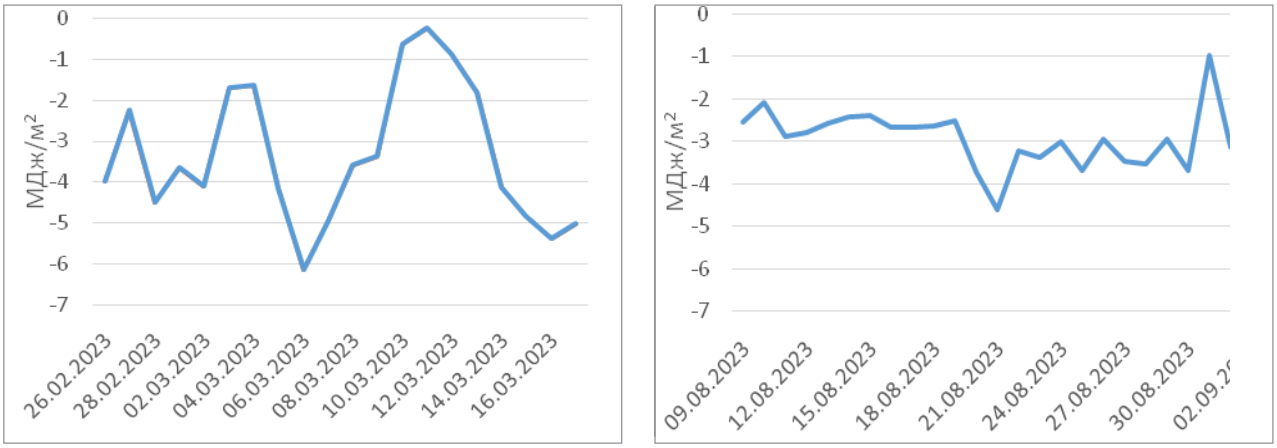


а) б)

Рисунок 4.48. Затраты тепла на испарение под кроной:
а) в весенний период; б) в летний период.

4.2.4.3. Турбулентный поток тепла

Аналогично затратам тепла на испарение сохраняется характер изменения значений в соответствии с радиационным балансом. Происходит сглаживание амплитуды отрицательных значений с весеннего к летнему периоду (рисунок 4.49).



а) б)

Рисунок 4.49. Турбулентный поток тепла под кроной:
а) в весенний период; б) в летний период.

4.2.4.4. Поток тепла в почве

Поток тепла в почве так же, как и на открытом участке, характеризуется попеременным нагревом и остыванием почвенного слоя в ограниченном диапазоне значений (рисунок 4.50).

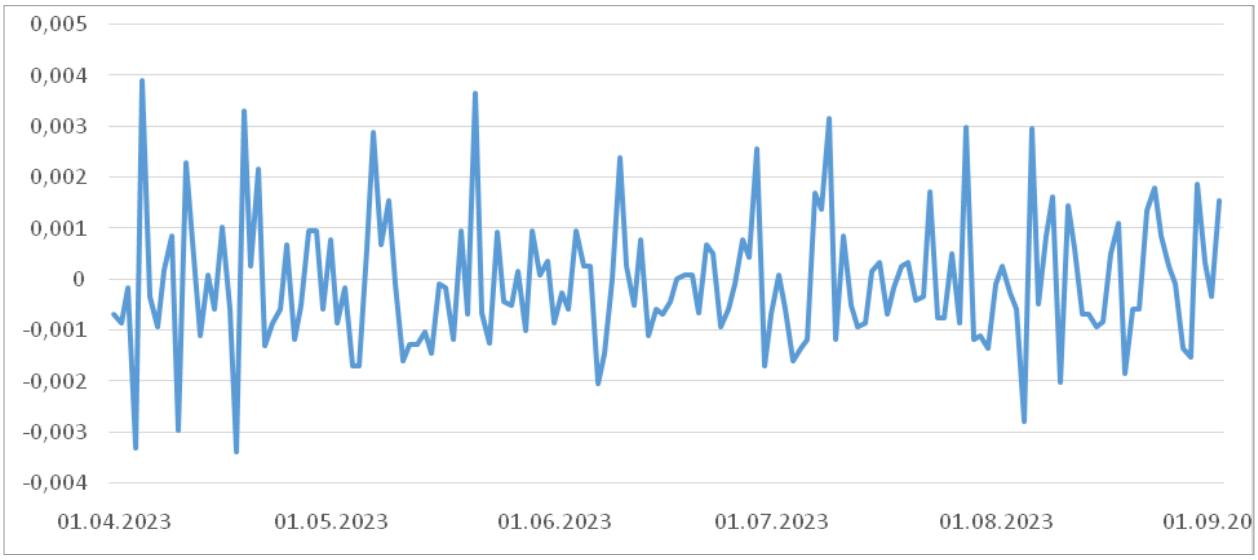


Рисунок 4.50. Поток тепла в почве под кроной

Несмотря на неполый ряд данных, на основании выявленных ранее закономерностей можно предположить ход дальнейшего изменения значений элементов теплового баланса. Затраты тепла на испарение и турбулентный поток тепла характеризуются аналогичным радиационному балансу характером изменения. Для потока тепла в почве отмечаются колебания значений около нуля с уменьшением их амплитуды в летний период.

4.2.4.5. Связь температуры воздуха с основными элементами теплового баланса

При рассмотрении хода температуры как основной характеристики тепла на (рисунок 4.51) отмечается закономерный рост среднесуточной температуры воздуха с зимнего по летний период. Также в лесу в рассматриваемый период практически всегда выше температура воздуха, чем на открытом участке, что объясняется сохранением тепла в подпологовом пространстве и уменьшением суточного перепада температур.

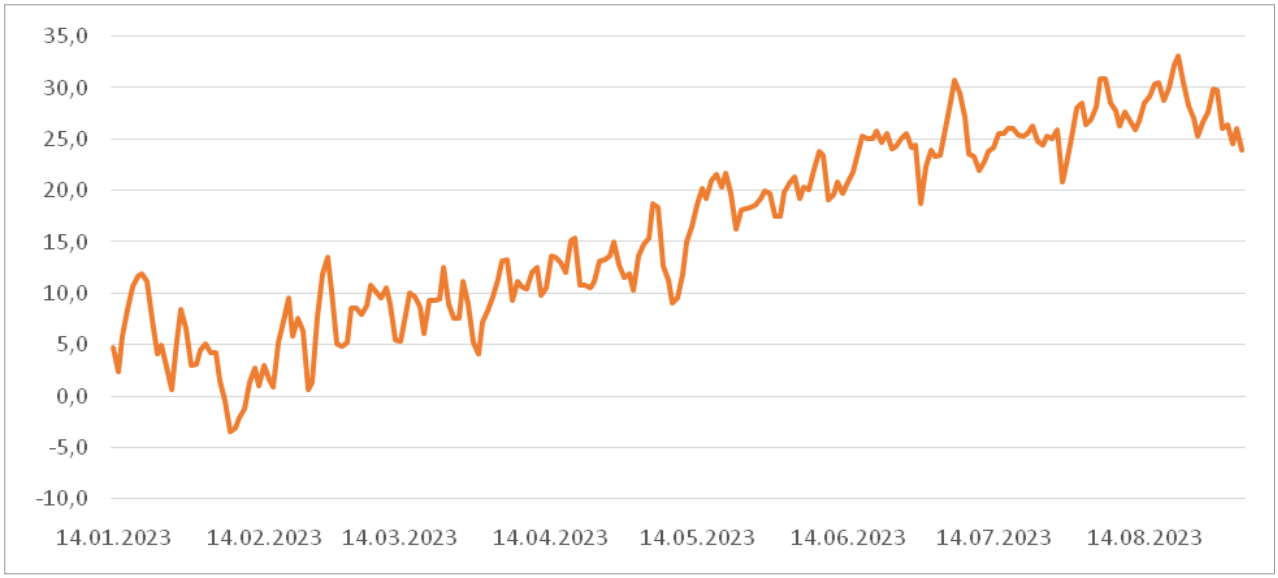


Рисунок 4.51. Температура воздуха под пологом можжевелового леса

При рассмотрении изменения температуры в течение суток в зимне-весенний период превышение значений в лесу могут составлять до 4°С, при этом в случае сильного охлаждения темпера воздуха за счёт сильной затененности медленнее возрастает, чем на открытом участке. Таким образом, возникают ситуации, при которых температура в лесу под пологом меньше, чем на открытом участке на 12°С. В летний период разница температур имеет более стабильный характер и варьируется в пределах 1–2°С.

Среднесуточные значения температуры почвы демонстрируют сохранение тепла пологом леса в зимний период, в марте значения выравниваются, и с весеннего периода отмечается снижение температуры под пологом леса по отношению к открытому участку (рисунки 4.52, 4.53).

Разница температур почвы между открытым участком и лесом более равномерная по сравнению со значениями воздуха и не имеет резких перепадов. В зимний период в среднем разница составляет около 1°С, максимум – 3°С. В редких случаях температура открытого участка может превышать значения до 1,6°С. Весной начинается превышение значений на открытом участке над значениями под пологом леса, в среднем превышение составляет 2,4°С, максимум составляет 8,6°С.

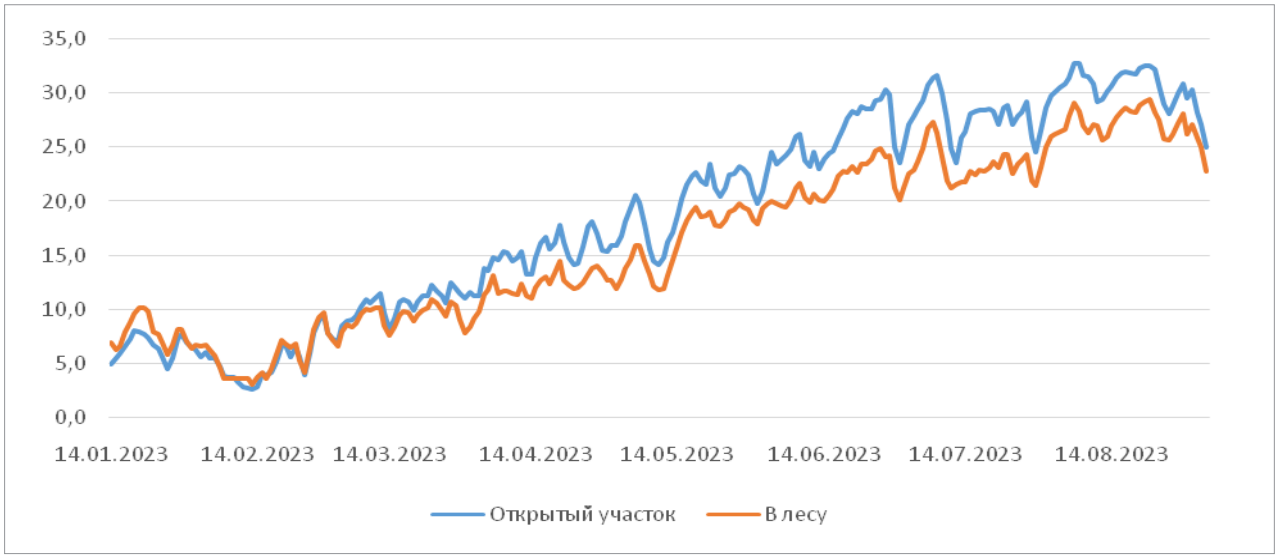


Рисунок 4.52. Температура почвы на открытом участке
и под пологом можжевелового леса

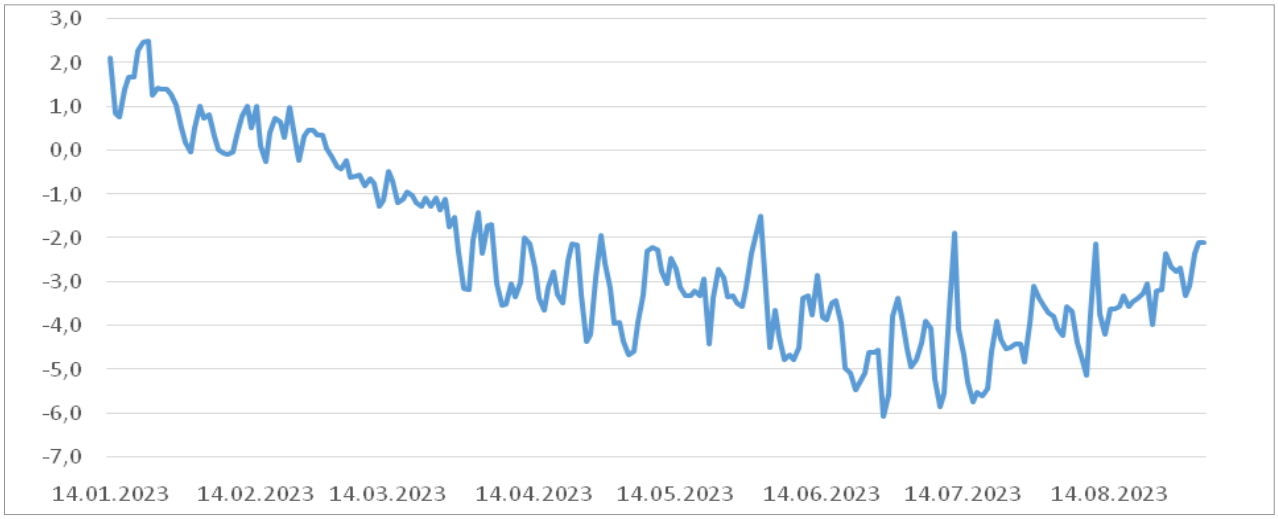


Рисунок 4.53. Разница температур почвы под пологом можжевелового леса
и на открытом участке

В летний период, в условиях тени под кроной, температура почвы снижается и в среднем имеет разницу с открытым участком до 4°С, а максимальная разница составляет 9,6°С.

Аналогично ситуации в пушистодубовом лесу при рассмотрении зависимости основных элементов теплового баланса от температуры наблюдается рост температуры при увеличении значений радиационного баланса, затрат тепла на испарение и турбулентного обмена (рисунки 4.54–4.57). Для теплового потока в почве данная закономерность не наблюдается.

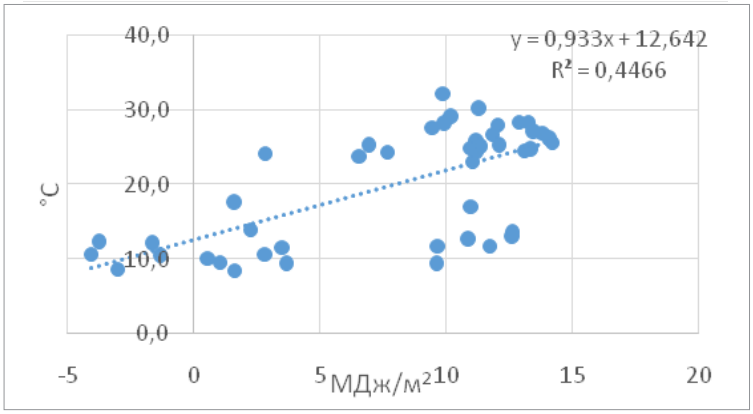


Рисунок 4.54. Связь значений температуры воздуха и радиационного баланса на открытом участке

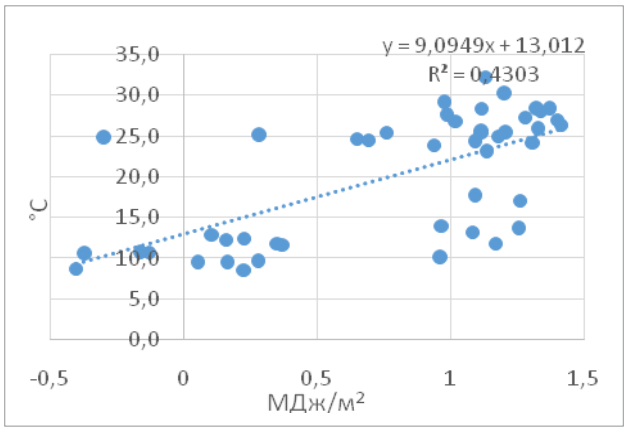


Рисунок 4.55. Связь значений температуры воздуха и затрат тепла на испарение на открытом участке

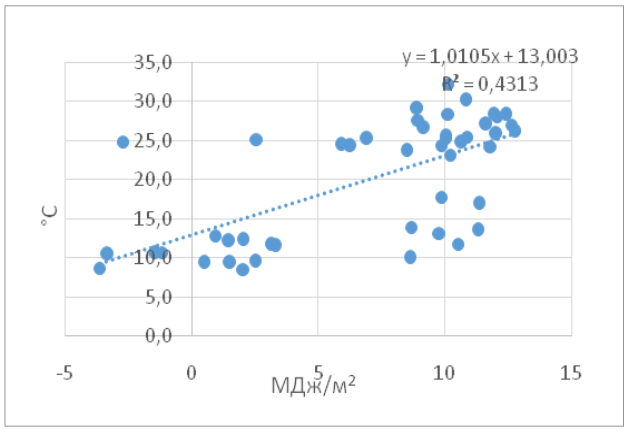


Рисунок 4.56. Связь значений температуры воздуха и турбулентного потока на открытом участке

Несмотря на общую закономерность распределения значений на открытом участке, в лесу отношение температуры воздуха к основным элементам теплового баланса значительно слабее.

4.2.5. Сравнительный анализ теплового баланса пушистодубового и можжевелового лесов

В пушистодубовых и можжевеловых лесах прослеживается единая закономерность изменения значений суточного радиационного баланса на открытом участке. Основные различия формируются за счёт разного характера растительности и особенностей рельефа. Так, в можжевеловом лесу с зимнего по летний период отмечается постепенное увеличение задержания кронами солнечной радиации, в то время как в пушистодубовом лесу на процесс постепенного развития кроны накладываются внешние факторы, такие как частая облачность

и тень от хребта в зимне-осенний период, что в итоге даёт относительно равные значения пропускания в зимний и весенний периоды с резким уменьшением значения пропускания в летний период. Данные условия определяют дальнейшее распределение значений элементов теплового баланса.

При рассмотрении радиационного баланса под кроной пушистодубового и можжевелового лесов отмечаются схожие значения на протяжении всего временного периода: около –6 МДж/м^2 зимой, около –3 МДж/м^2 с большим разбросом значений весной и небольшой амплитудой летом.

При рассмотрении значений затрат тепла на испарение под кроной отмечаются отрицательные значения, демонстрирующие преобладание конденсации над испарением. Это объясняется характерной для зимнего периода пасмурной погодой и образованием тумана. В весенний период рассматриваемый показатель заметно возрастает.

Затраты тепла на испарение под кроной в обоих сообществах характеризуются отрицательными значениями, однако в пушистодубовом сообществе происходит постепенный рост зимних значений к весенним в среднем с –0,5 МДж/м^2 до –0,2 МДж/м^2, а в можжевеловом сообществе сохраняется среднее значение –0,3 МДж/м^2 с изменением амплитуды перепадов значений.

Для турбулентного потока тепла сохраняется ситуация, аналогичная затратам тепла на испарение с ростом значений с –5,5 МДж/м^2 до –3 МДж/м^2 в пушистодубовом лесу, и –3 МДж/м^2 – в можжевеловом.

Поток тепла в почве в пушистодубовом и можжевеловом лесах колеблется около нуля, основным отличием является амплитуда колебаний. В пушистодубовом лесу значения колеблются от –0,013 МДж/м^2 до 0,012 МДж/м^2, а в можжевеловом от –0,003 МДж/м^2 до 0,004 МДж/м^2.

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 разницах 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 можжевеловом лесу летнее превышение температуры на открытом участке над лесом достигает до 6°С.

Для температуры почвы характерны аналогичные изменения. На обоих участках в зимний период под пологом леса происходило сохранение тепла и значения температуры превышали измерения на открытом участке, выравнивание значений в марте, и снижение значений под пологом относительно открытого участка.

Связь значений температуры воздуха и элементов теплового баланса на открытом участке в среднем составляет 0,36, что свидетельствует о непрямой взаимосвязи рассматриваемых параметров. В можжевеловом лесу коэффициент корреляции в среднем составляет 0,43. Под пологом леса данный коэффициент значительно ниже, что демонстрирует более сложную систему взаимосвязей.

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

4.3. Водный баланс

Водный баланс какой-либо территории зависит от климатических факторов и характера подстилающей поверхности. В литературе приводятся различные значения среднегодового количества осадков, выпадающих на территории Карадага. В среднем на Карадаге выпадает 357 мм осадков (за период с 1930 по 1980 гг.) (Природа Карадага, 1989), по другим данным – 389 мм осадков (за период с 1920 по 2006 гг.) (Карадаг заповедный, 2011), 501 мм осадков (за

период с 2000 по 2011 гг.) и 467 мм осадков (за период с 2012 по 2018 гг.) по данным (Зуев и др., 2020).

Согласно нашим наблюдениям, на территорию Карадага с 2010 по 2020 гг. выпадает в среднем 448 мм осадков. Это значительно меньше, чем в типичном Средиземномноморье. В силу нахождения пушистодубовых лесов в Крыму на северно-восточном ареале своего существования условия среды можно рассматривать как переходные от оптимальных к пессимальным. Например, в пределах пушистодубовых лесов, произрастающих примерно в 15 км к северу от Монпелье в Южной Франции на высоте 250 м, среднегодовое количество выпадающих осадков составляет 1311 мм (Damesin, Rambal, 1995). В Италии пушистодубовые леса получают примерно 850 мм осадков, а в районе города Эвора в Португалии – 665 мм (Baldocchi et al., 2010).

В межгодовой динамике количества выпадающих осадков наблюдается большой диапазон значений: в 2020 г. в среднем на Карадаге выпало 275 мм осадков, а в 2010 г. – 715 мм, и, таким образом, амплитуда достигает 440 мм. В 2010–2020 гг. прослеживается тенденция на сокращение количества выпадающих осадков – 2019 и 2020 гг. характеризуются крайне низкими годовыми значениями.

Во внутригодовой динамике в пределах пушистодубовых лесов наблюдается постоянный зимний максимум осадков. В отдельные годы (2013 г., 2014 г.) на исследуемой территории наблюдались абсолютные максимумы осадков в июне (45% от годовой суммы осадков), носившие катастрофический характер для окружающей среды. Июль и август характеризуются стабильными засушливыми условиями – в среднем 31 мм. Зимний максимум характеризуется преобладанием или равномерным распределением осадков в течение поздней осени и зимних месяцев. Среднее количество выпадающих осадков в декабре – 45 мм, в январе – 48 мм, а в феврале – 33 мм. Весенние и осенние минимумы осадков характеризуются уменьшением количества выпадающих осадков – в среднем весной в пределах пушистодубовых лесов выпадает 27 мм осадков, а осенью – 34 мм.

В рамках исследований получены данные метеостанций, расположенных в зоне произрастания пушистодубового и можжевелового лесов. С их помощью можно проследить распределение количества осадков в течение года (рисунок 4.57) и их интенсивность.

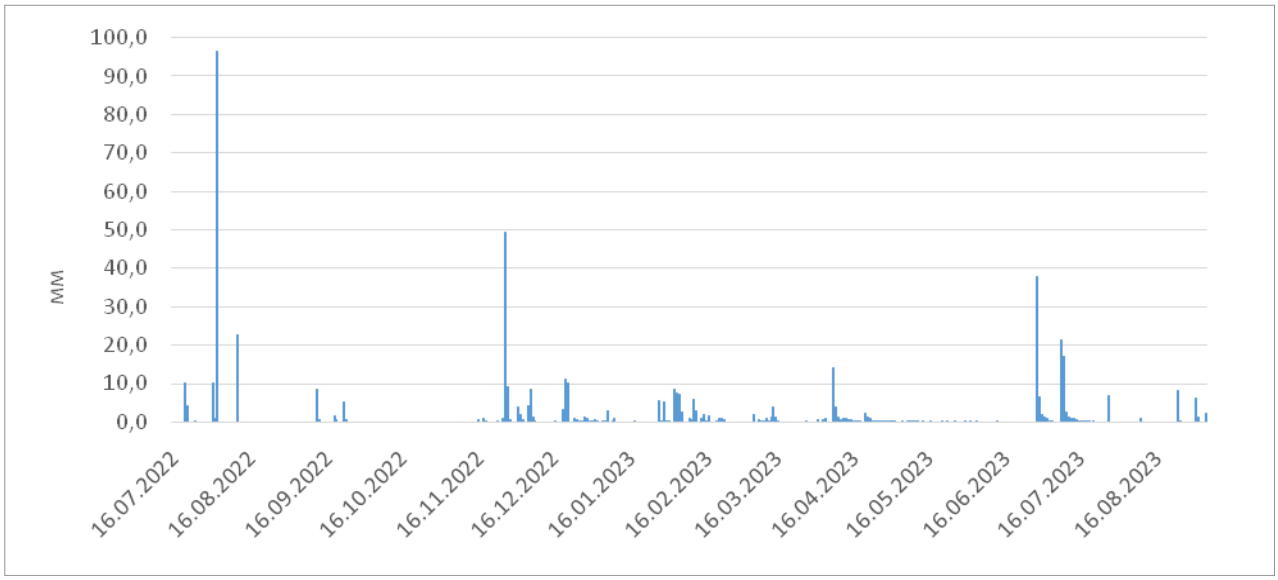


Рисунок 4.57. Количество осадков в сутки в пушистодубовом лесу, мм

Суммарно за год проведения измерений на исследуемом участке выпало 473.3 мм осадков. Согласно полученным данным, основное количество осадков выпадает в зимний период.

При этом в течение года отмечаются дни с экстремальным количеством выпавших осадков, максимум приходится на август, повторяя ситуацию 2013 и 2014 годов. Интенсивность дождя фиксируется метеостанцией как количество осадков за час в условиях, при которых интенсивность дождя была бы постоянной в течение этого времени. Большая часть осадков выпадала с интенсивностью, не превышающей 6 мм/час, однако в августе во время экстремальных осадков интенсивность достигала 88 мм/час, 176 мм/час, а максимум достиг 298,7 мм/час. Годовое количество осадков в районе ключевого участка можжевелового леса представлено на рисунке 4.58.

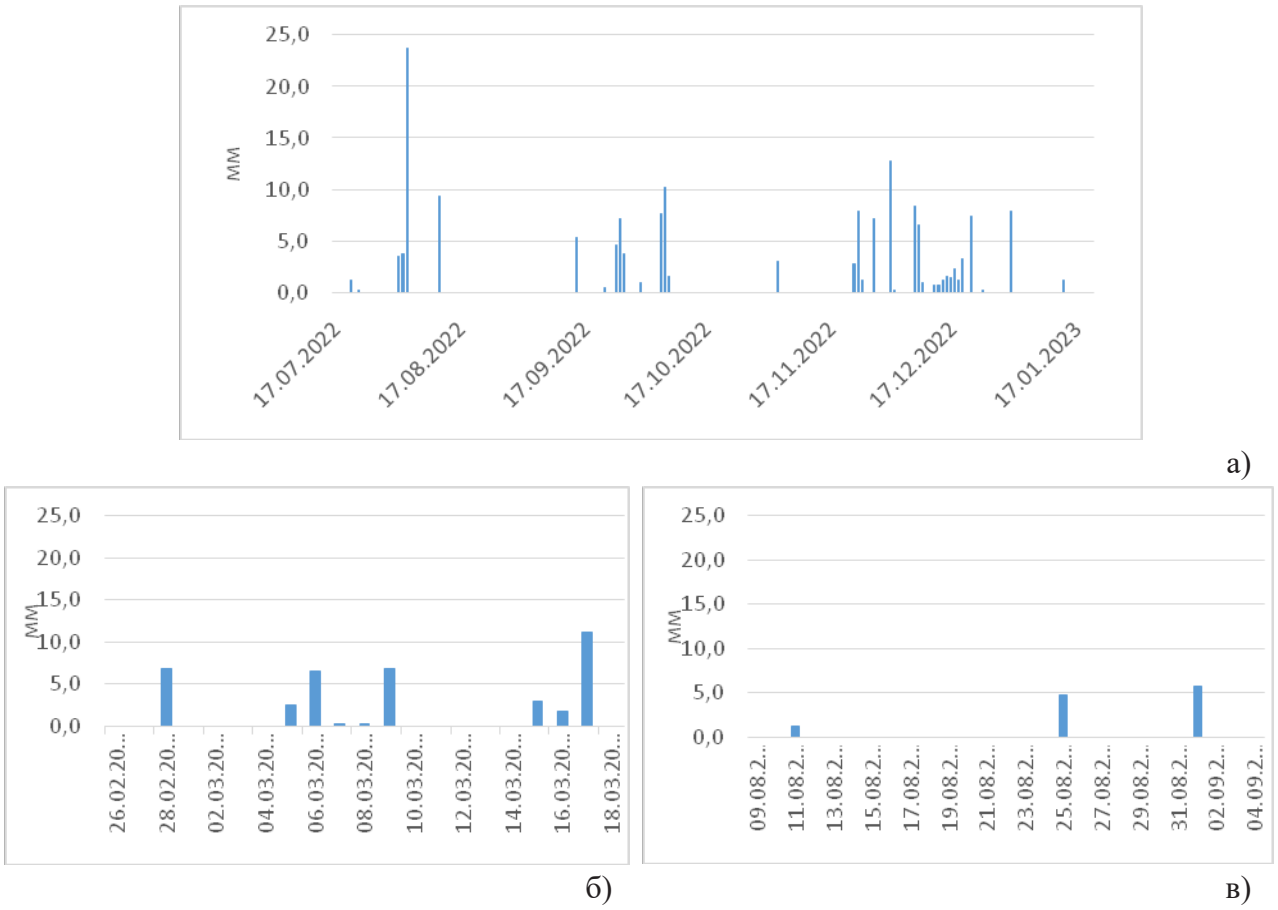


Рисунок 4.58. Количество осадков (мм) в можжевеловом лесу в период: а) с июня 2022 года по январь 2023 года; б) с февраля по март 2023 года; в) в августе 2023 года.

Зафиксированный максимум осадков в период исследований приходится на 4 августа с 23,6 мм осадков в сутки, также сильные дожди характерны для осенне-зимнего периода с дневным количеством осадков около 10 мм, в остальные периоды выпадает около 5 мм осадков в сутки. Помимо разницы в количестве осадков отмечаются и значительные перепады интенсивности. В целом интенсивность варьировалась от 1 мм/час до максимума 176,3 мм/час. Данный максимум соответствует дню с наибольшим количеством выпавших осадков, и, как правило, количество осадков соотносится с их интенсивностью. Но фиксируются дни с кратковременными ливневыми осадками, в результате которых с высокой интенсивностью выпадает от 1 до 4 мм осадков.

Пушистодубовые сообщества задерживают кронами примерно 24% выпадающих атмосферных осадков, что составляет в среднем 104 мм. На территории Карадага при относительно малом количестве выпадающих осадков леса могут задерживать до 100% осадков (Зуев и др., 2020). При этом существует внутригодовая динамика этого процесса, связанная как со

стадиями вегетации растений, так и с интенсивностью осадков. Так, максимальные значения задержания кронами осадков характерны для второй половины весны – начала лета в силу того, что именно в этот период растения достигают наибольшего пика зеленой фитомассы. Например, в июле в среднем задерживается 9 мм осадков или около 41% выпадающих осадков. Интенсивность выпадающих осадков также влияет на их удержание кронами деревьев. В работе (Зуев и др., 2020) указывается, что при выпадении на Карадаге осадков более 20 мм задерживается до 20% выпадающих осадков, а при выпадении менее 2 мм осадков задерживается более 45% выпадающих осадков. Анализ данных показывает, что рост количества осадков, наблюдаемый в Юго-Восточном Крыму, формируется за счёт летних ливневых осадков (Зуев и др., 2020), а это в свою очередь приводит к тому, что большая часть воды проникает под полог леса, практически не задерживаясь в кроне. Крупные капли, характерные для ливневых осадков, слабо задерживаются на листьях и быстро стекают на поверхность лесной подстилки.

Существенную роль в структуре водного баланса пушистодубовых лесов оказывает стволовой сток. Этот эффект интересен, так как, по сути, он концентрирует водный поток непосредственно под корни деревьев, питая их. Однако в условиях склонового рельефа такой процесс может усиливать плоскостной смыв почвы, вызывать капельную и мелкоструйчатую эрозию почв, как следствие обнажать корни деревьев и тем самым усиливать процессы формирования бедлендов. В работе (Ландшафтно-геофизические условия..., 2001) приводится методика оценки стволового стока на территории Карадага, однако не приводятся количественные характеристики полученных результатов эксперимента. А. А. Клюкин (2007) отмечает, что в дубовом лесу сомкнутостью 0,8, произрастающем на склоне крутизной 20–25° и длиной 100 м, средняя скорость приствольной эрозии-аккумуляции составляет около 0,004 мм/год. В то же время А. А. Клюкин (2007) указывает на тот факт, что на крутых и коротких склонах, которые примыкают к руслам долин рек и тальвегам временных водотоков, средняя скорость разрушения может достигать 2,0–3,9 мм/год и сопровождаться обнажением материнской породы. Таким образом, такие процессы характерны для крутых склонов. На склонах средней и малой крутизны они мало проявляются и почва, как правило, хорошо задерживается травянистым ярусом. А. А. Клюкин (2007) отмечает, что со стволов взрослого дуба может стекать 5–6 литров осадков в год, что, по нашему мнению, значительно завышено для исследуемых лесов. Более объективными представляются данные, представленные в работе (Кочкин, 1967), где указывается, что сток со стволов дуба достигает 3–5% от годового слоя атмосферных осадков, что составляет примерно 20–40 мм/год. На стволовой сток также активно влияет шероховатость коры ствола деревьев, которая показывает, насколько реальная площадь стока больше идеальной цилиндрической формы ствола. У дубовых лесов этот показатель, по (Ландшафтно-геофизические условия..., 2001) достигает 1,2, а это в свою очередь позволяет отнести их к средне–шероховатым породам. Для сравнения, в Испании стволовой сток в дубовых лесах достигает чуть более 10% от количества выпавших осадков (Bellot, Escarre, 1998).

Сток с крон деревьев по измеренным данным на модельных деревьях составляет около 75% от количества выпадающих осадков. Следует отметить, что подобные же результаты были получены и экспедициями В. А. Бокова в этом районе в 1997 и 1998 гг. (Ландшафтно-геофизические условия..., 2001). Согласно его исследованиям, сомкнутый пушистодубовый лес в вегетационный период с мая по октябрь перехватывает около 25–35% выпадающих осадков, что составляет примерно 103 мм во влажном 1997 г. и 55 мм в сухом 1998 г. Однако эта влага, поступая на поверхность почвы постепенно, с меньшей скоростью, чем ливневые осадки, как правило, хорошо удерживается лесной подстилкой, формируя ее влагозапас. Это около 28 и 35% от слоя осадков, выпавших за вегетационный период, 18 и 16% от годового слоя осадков. В зимний период, в условиях отсутствия вегетации у лиственных пород, когда на деревьях нет листвы, выпадающие осадки практически полностью проникают под полог леса, лишь частично задерживаясь ветвями деревьев. По результатам измерений в зимний период задер-

жание осадков не превышает среднегодовые значения и составляет чуть более 20%. В то же время нужно понимать, что на зимние месяцы приходится максимум осадков, и с учетом просачиваемости сквозь кроны этот показатель значительно больше летнего максимума и достигает не более 15 мм. Эти данные частично подтверждаются и в работе (Горбунов и др., 2009), где указано, что за период с 2000 по 2008 гг. в пределах пушистодубовых лесов Юго-Восточного Крыма было задержано 162 мм, что составляет примерно 30% от количества выпавших осадков. Вместе с тем, как показывают наблюдения, для зимнего максимума осадков не столь характерны ливневые дожди, что приводит к возможности хорошего промачивания лесной подстилки и почвы. М. А. Кочкин (1967) отмечает, что лесная подстилка дубовых лесов, состоящая из листьев и отмершей травянистой растительности, впитывает и задерживает воду выпадающих осадков и тем самым уменьшает поверхностный сток.

За период с 2010 по 2020 гг. наблюдается существенное уменьшение влажности почвы – в среднегодовом выражении примерно в 1,6 раза. Межсезонная динамика уменьшения влажности почвы показывает, что практически все сезоны года характеризуются падением средних значений относительной влажности, близких к среднегодовому значению, за исключением осени, когда относительная влажность уменьшается в 1,4 раза. Рассматривая межгодовую динамику важно выделить тот факт, что наблюдается существенное сокращение влажности почвы в декабре (более чем в 2,5 раза) и незначительное сокращение в сентябре. Максимальными относительными значениями влажности почвы характеризуются зимние месяцы, а также март, когда среднее значение не опускается ниже 25%, а минимальными – конец лета – начало осени (август и сентябрь), когда значения относительной влажности почвы опускаются до 15–18%.

Благодаря дополнительному блоку датчиков на открытом участке в зоне произрастания пушистодубового леса была измерена влажность почвы на разных горизонтах (рисунок 4.59).

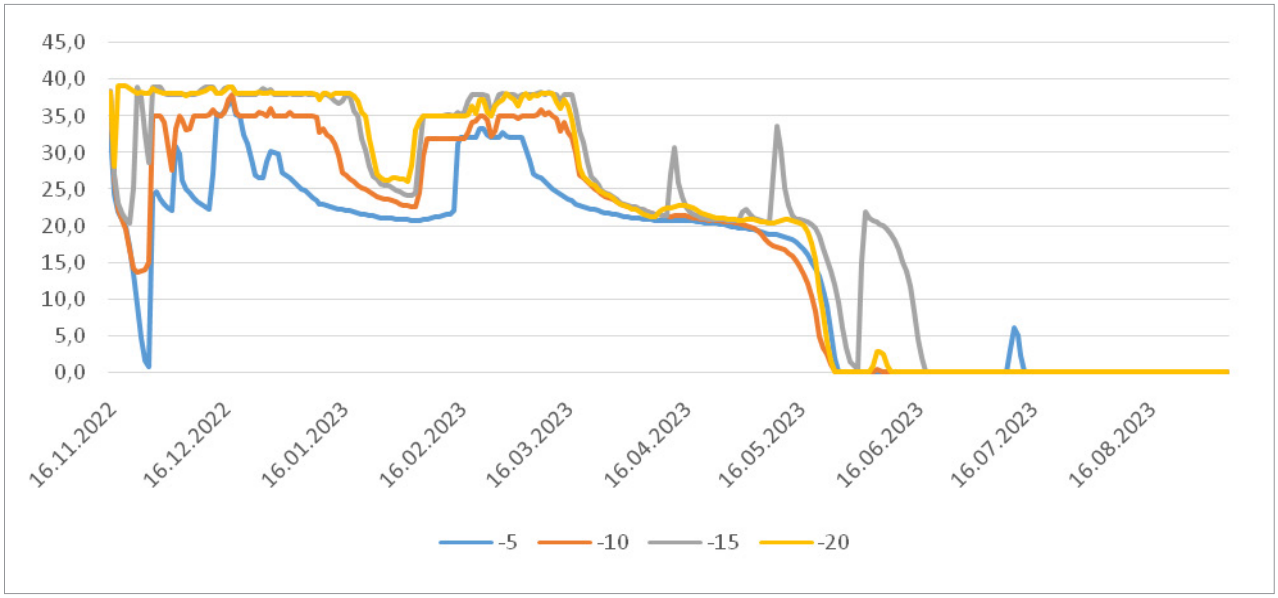


Рисунок 4.59. Изменение влажности почвы на разных горизонтах в пушистодубовом лесу

В зимний период и ранней весной фиксируются высокие значения влажности почвы с постепенным уменьшением показателя к поверхности. Выделяются три основных горизонта влажности: –5 см с наименьшими значениями, –10 см промежуточный слой и –15 см, ниже которого сохраняются максимальные значения влажности почвы. Более глубокие горизонты почвы характеризуются плавным изменением значений влажности, в то время как поверхностный слой сильнее подвержен влиянию внешних факторов и изменяется значительно сильнее.

Данные значения объясняются высокой облачностью, осадками и ежедневными туманами на рассматриваемой территории, что и создает условия избыточного увлажнения. Затем идет снижение значений в весенний период и резкий спад летом. При этом, в связи со спецификой датчиков, «0» обозначает отсутствие доступной растениям влаги в почве, а не абсолютное ее отсутствие, но само значение влажности достаточно мало.

Влажность почвы в можжевеловом лесу представлена в виде месячных значений (рисунок 4.60).

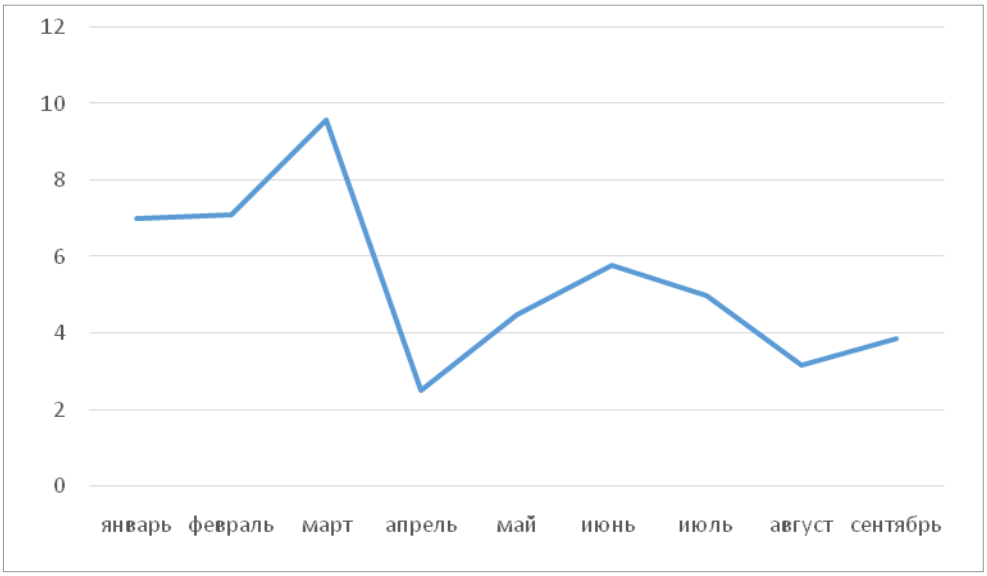


Рисунок 4.60. Влажность почвы в можжевеловом лесу

Аналогично ситуации в пушистодубовом лесу максимальные значения влажности почвы отмечаются в зимний период и начале марта, а затем происходит снижение значений летом.

Помимо описанных выше данных по водному балансу территории стоит отметить выявленные в ходе комплексных исследований особенности почвы в можжевеловом лесу. В ходе лабораторного анализа свойств почвы выявлено, что, в отличие от почвы в пушистодубовом лесу, почва под можжевельниками практически не пропускает воду. Намокание произошло только в верхнем сантиметровом слое, а для полного намокания пришлось приложить значительные усилия. Данный факт позволяет предположить, что большая часть попадающих на поверхность почвы осадков не проникает в почву, а стекает вниз по склону, не задерживаясь в ландшафте.

Причиной данного явления может быть наличие в хвойных растениях масел, которые образуют своеобразную пленку, затрудняющую пропускание влаги. Однако в связи со случайным обнаружением данного факта соответствующие исследования для подтверждения гипотезы не проводились. Дальнейшее изучение данного явления позволит дополнить подход к изучению водного баланса ландшафтов хвойных лесов.

Эвапотранспирация в пределах пушистодубовых лесов за период с 2010 по 2020 гг. составляет в среднем 450 мм. Эти значения в целом равнозначны эвапотранспирации дубовых лесов в Средиземноморском регионе: 343±37 мм в целом для Средиземноморья (Baldocchi et al., 2010), 458 мм в провинции Таррагона в Испании (Bellot, Escarre, 1998), 823 мм в восточных Пиринеях (Cristóbal et al., 2011). Максимально значения эвапотранспирации в Средиземноморье могут достигать 1300 мм в год (Llorens, Francisco, 2007).

Если проанализировать межгодовую динамику величин эвапотранспирации в пределах дубовых лесов Карадага, то ее величины формируют устойчивый тренд к увеличению, что говорит о формировании более сухого климата территории (рисунок 4.61).

В то же время следует отметить, что при рассмотрении среднегодовых значений эвапотранспирации в пределах пушистодубовых лесов в отдельные годы, когда среднегодовое количество выпадающих осадков превышает испарение (2010, 2016, 2018 гг.), среднегодовые значения водного баланса остаются отрицательными.

Если рассматривать значения эвапотранспирации по сезонам года, то отчетливо проявляется факт преобладания количества выпадающих осадков над эвапотранспирацией в зимний и осенний периоды. Средние значения эвапотранспирации в зимний период составляет 11 мм, что составляет примерно 26% от количества выпадающих осадков. Осенью средние значения эвапотранспирации составляют 22 мм, что составляет примерно 63% от среднего количества выпадающих осенью осадков. В остальные сезоны года наблюдается превышение значений эвапотранспирации над количеством выпадающих осадков. Весной среднее значение эвапотранспирации составляет 56 мм, что в 2 раза превышает среднее количество выпадающих осадков за этот сезон года, а летом – 67 мм, что в 1,5 раза больше среднего количества выпадающих осадков летом. В то же время во все сезоны года имеется устойчивая тенденция к увеличению среднегодовых значений эвапотранспирации.

Рисунок 4.61. Среднегодовые значения связи эвапотранспирации и количества выпадающих осадков в пушистодубовом лесу в 2010–2020 гг.

Если говорить о распределении эвапотранспирации по месяцам, то за рассматриваемый период наибольшие значения эвапотранспирации характерны для мая, июня и июля, когда средние значения эвапотранспирации превышают 70 мм, наименьшие для декабря, января и февраля, когда средние значения эвапотранспирации не превышают 15 мм. Весной наблюдается плавный рост значений эвапотранспирации, а осенью – плавное снижение. В то же время анализ данных показывает и тот факт, что в последние годы наблюдается значительный рост эвапотранспирации в конце лета – начале осени.

Помимо расчетных значений эвапотранспирации в ходе исследований получены данные измерения метеостанции. При этом важно обратить внимание, что описываемая величина самостоятельно рассчитывается метеостанцией на основе температуры воздуха, влажности, средней скорости ветра и солнечного излучения, но не происходит учет конденсации. Таким

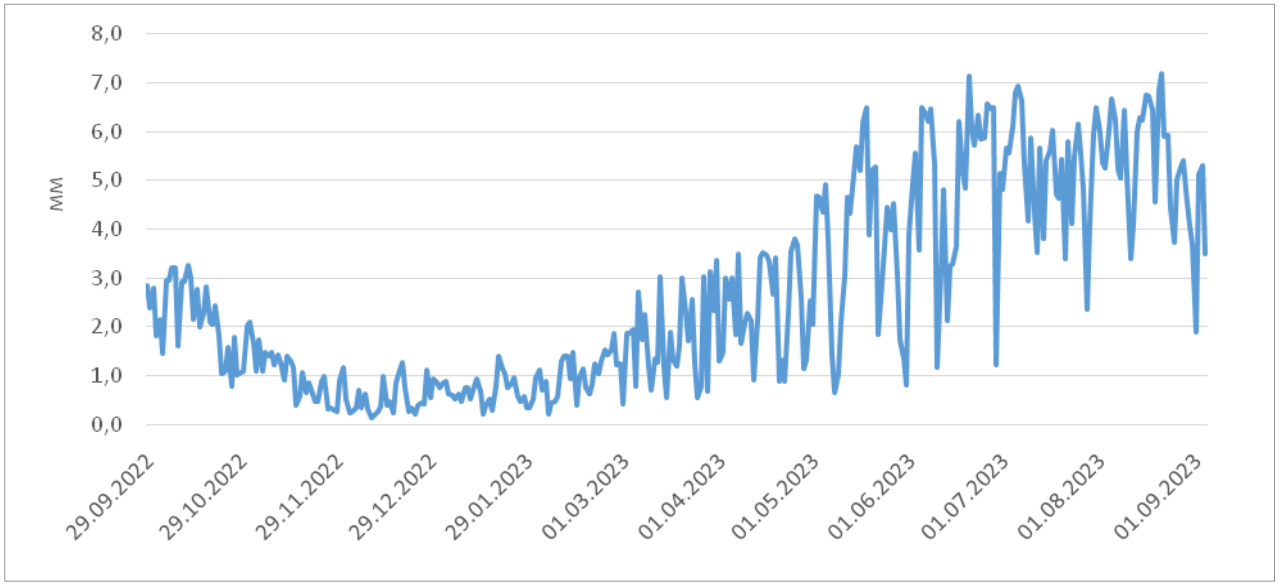


Рисунок 4.62. Эвапотранспирация в пушистодубовом лесу, мм

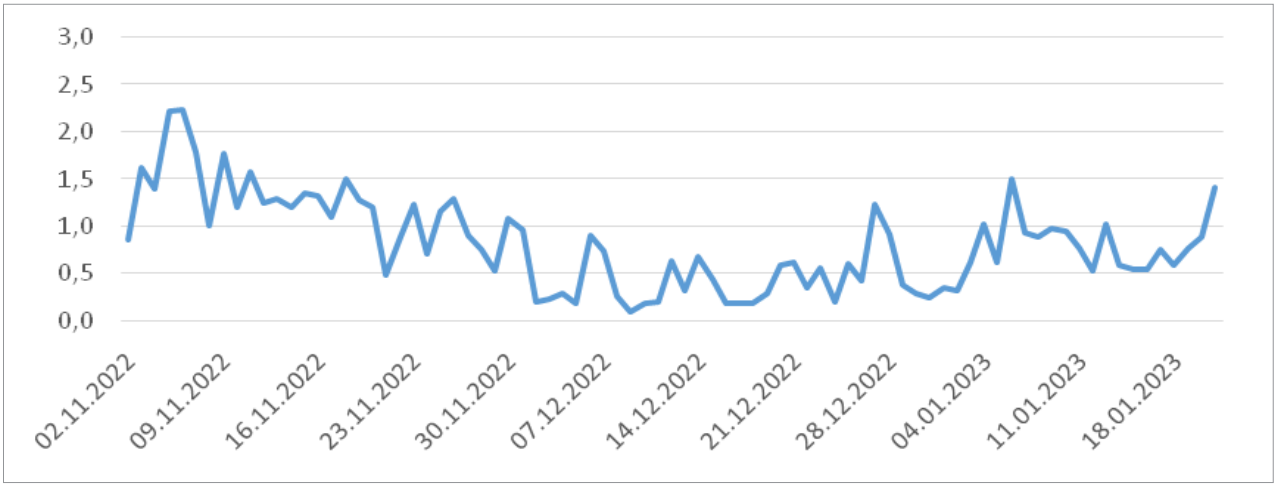
образом, фиксируются только положительные значения днем и 0 в ночное время, что дает завышенные дневные значения, но позволяет проследить основную тенденцию их изменения (рисунок 4.62).

Наименьшие значения эвапотранспирации фиксируются в зимний период, затем происходит постепенное увеличение эвапотранспирации с ростом амплитуды к летнему периоду.

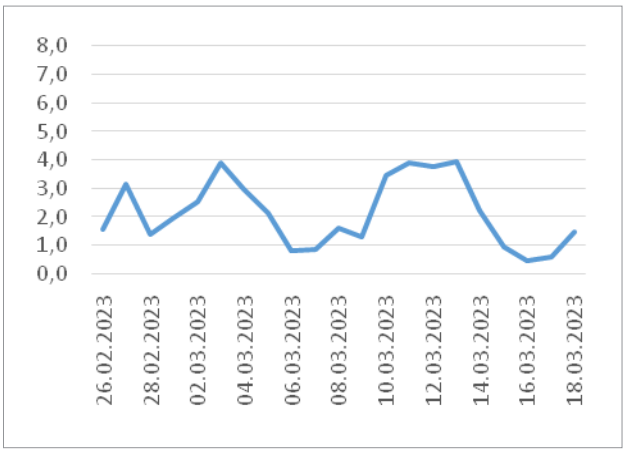
Аналогичные измерения проводились в можжевеловом лесу, в котором также просматривается сезонная динамика изменения значений эвапотранспирации (рисунок 4.63).

С конца осеннего периода происходит снижение дневных значений практически до 0, а в весенний период постепенно достигает 4 мм. Наибольшие значения закономерно отмечаются в летний период, максимум достигает 7,4 мм.

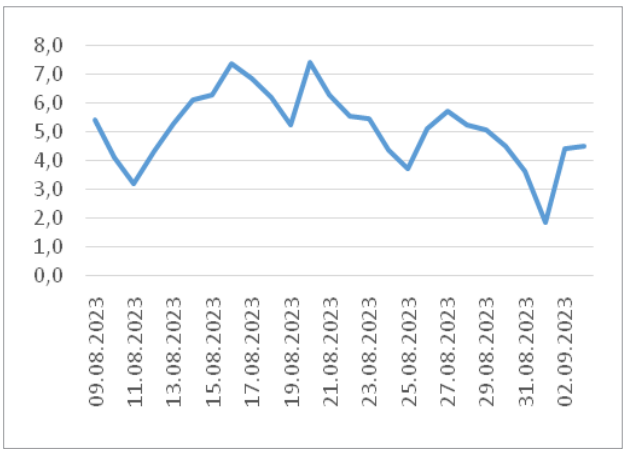
Важным аспектом в пространственной дифференциации пушистодуборивых лесов играют снегосборы. А. А. Клюкин (2007) отмечает, что в Юго-Восточном Крыму зимой бывает 6–7 дней с обложными моросящими дождями, а снег выпадает несколько раз, но быстро стаивает во время оттепелей. На Карадаге около 5% осадков выпадает в виде снега (Природа Карадага, 1989). По данным (Ландшафтно-геофизические условия..., 2001), в Юго-Восточном Крыму в районе Карадага и Эчкидага с наветренных северо-восточных склонов может сдуваться от 50% до 90% снега. Как правило, зимние осадки практически не задерживаются кронами деревьев ввиду отсутствия листовых пластин, однако ввиду ветрового переноса могут выдуваться. Так, например, в 2019 г. в результате деятельности ветра образовался слой снега высотой в 15 см. За период с 2011 по 2020 гг. среднегодовое количество осадков в твердой форме составило 38 мм, что составляет примерно 9% от общего количества выпадающих осадков. Однако, если говорить о межгодовой динамике рассматриваемых показателей, то отчетливо выделяются года с минимальным количеством выпадения твердых осадков (2013 г., 2020 г.), когда количество выпавших осадков в твердой форме не превышало 10 мм, и максимальным – например, 2015 и 2016 гг., когда количество выпавших осадков в твердой форме было более 60 мм. Несмотря на то, что продолжительность залегания снега на территории Юго-Восточного Крыма составляет не более недели, здесь очень характерно явление снегосборов, откуда накопленный снег передувается на склоны южных экспозиций, формируя на них более гидрофильные условия, чем на склонах северных экспозиций. Например, в пределах одной из балок на восточном склоне хребта Беш-Таш склон южной экспозиции характеризуется лучшим увлажнением, нежели противоположный, из-за прилегающего к



а



б



в

Рисунок 4.63. Эвапотранспирация (мм) в можжевеловом лесу:
а) в осенне-зимний период; б) в весенний период; в) в летний период.

склону юго-юго-западной экспозиции обширного снегосбора, откуда при северо-восточных ветрах снег передувается на склон юго-юго-западной экспозиции (рисунок 4.64) (Горбунов, Горбунова, 2014). В связи с этим склон юго-юго-западной экспозиции лучше залесён и характеризуется большей эрозионной изрезанностью по сравнению с противоположным склоном северо-северо-восточной экспозиции и на склонах юго-юго-западной экспозиции отмечаются участки с сильно смытым почвенным покровом.

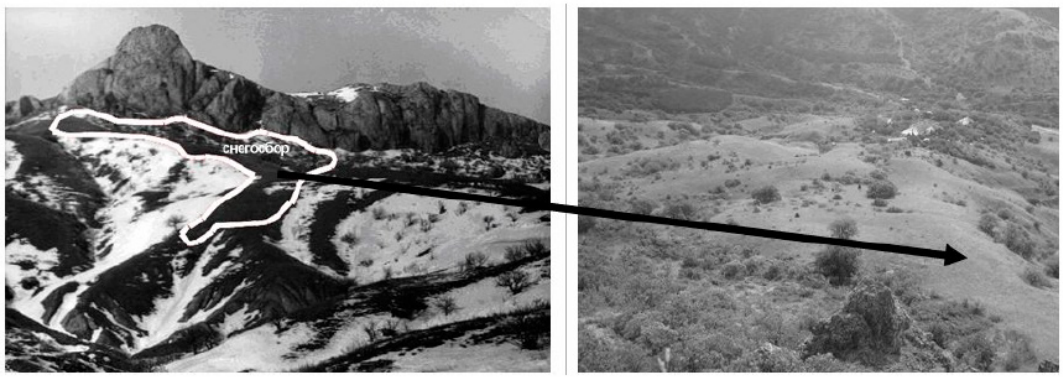


Рисунок 4.64. Заснеженные склоны юго-юго-западной экспозиции балки на восточном склоне хр. Беш-Таш (Горбунов, Горбунова, 2014)

Формирование поверхностного стока зависит от целого комплекса факторов. Наблюдения, выполненные на стоковых площадках, позволили установить, что имеет наличие склоновый сток, который характеризуется незначительными показателями. В большинстве случаев сток вызывается либо таянием снега, либо выпадением интенсивных осадков. В 1996–1997 гг. средний сток составлял примерно 0,16 л/км^2 (Ландшафтно-геофизические условия..., 2001). Среднее значение стока с 2010 по 2020 гг., зафиксированное по результатам измерений, составило 0,04 л/км^2. Наибольшие средние значения стока зафиксированы в 2010 г. и составляют 0,09 л/км^2, а наименьшие в 2011 и 2020 гг. – чуть менее 0,02 л/км^2. Таким образом, эти значения практически не оказывают влияние на итоговое уравнение водного баланса пушистодубовых лесов. Следует отметить снижение значений поверхностного стока в межгодовой динамике за рассматриваемый период.

Большую роль в формировании водного баланса пушистодубовых лесов играют горизонтальные осадки (конденсация из тумана, изморозь, наморось, гололед и др.). Согласно данным (Ведь, 1967), их вклад может достигать 20–25% от годового слоя осадков. С сентября по март в пределах пушистодубовых лесов может наблюдаться не более 20 дней с туманами, а в год – от 20 до 40 дней с туманами (Климатический атлас Крыма, 2000). По данным метеостанции Феодосии (Трансформация водного баланса..., 2011), в среднем наблюдается 24 дня с туманами в год. В 2020 г. в пределах пушистодубового леса зафиксировано 36 дней с туманом, из которых 75% пришлось на зимний период, что существенно влияет на приходную часть водного баланса.

При рассмотрении конденсации на растениях выбраны два участка: степной участок в зоне произрастания дуба пушистого и под кроной деревьев. В ноябре в утреннее время на обоих участках фиксируется высокая конденсация (практически вся поверхность листа покрыта влагой). В зависимости от погодных условий в конкретный день время выпадения конденсата может сдвигаться как в ночь, так и на день, при этом под кроной отмечается более плавный характер изменения степени увлажнения листа. В зимний период отмечаются дни, в которые конденсация отмечается круглосуточно, и для степного участка характерны меньшие значения, чем под кроной. Также зафиксированы дни, в течение которых конденсации не зафиксировано, но в большинстве случаев она отмечается ранним утром. Помимо этого, под кроной может наблюдаться очень малое количество конденсируемой влаги, в то время как на отрытом участке ничего не фиксируется.

В весенний период происходит превышение увлажненности листовой пластины под кроной над открытым участком, фиксируется увеличение продолжительности и степени увлажнения. С конца мая образование конденсата перестает иметь ежедневный характер, также отмечается превышение степени увлажнения на открытом участке, что может быть связано с более резким перепадом температур, чем под кроной.

Все описанные выше процессы протекают на фоне вытеснения степных сообществ верхних частей склонов лесными. Дело в том, что 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, снижая количество склоновых микрозон. Это явление отчетливо видно при расчете вегетационного индекса NDVI (рисунки 4.65, 4.66).

При анализе средних значений NDVI за август, полученных по космическим снимкам Sentinel-2 в период с 2016 по 2018 гг. и с 2019 по 2021 гг., можно отчетливо наблюдать рост значений вегетационного индекса NDVI и, как следствие, увеличение количества зеленой фитомассы.

На рисунке 4.66 видно, что до высоты 158 м на профиле произрастает лесная растительность и значения NDVI за два периода практически не изменяются. В то же время выше отметок 158 м, где изначально древесной растительности меньше, и в августе, соответственно, меньше зеленой фитомассы, наблюдается рост значений NDVI и соответственно количество зеленой фитомассы.

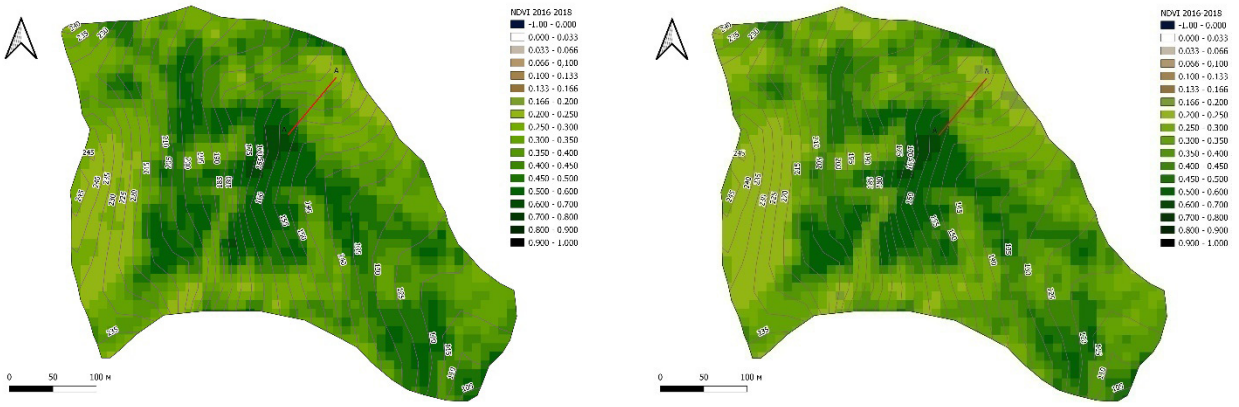


Рисунок 4.65. Сравнение значений NDVI в 2016–2018 (a) и 2019–2021 гг. (b)

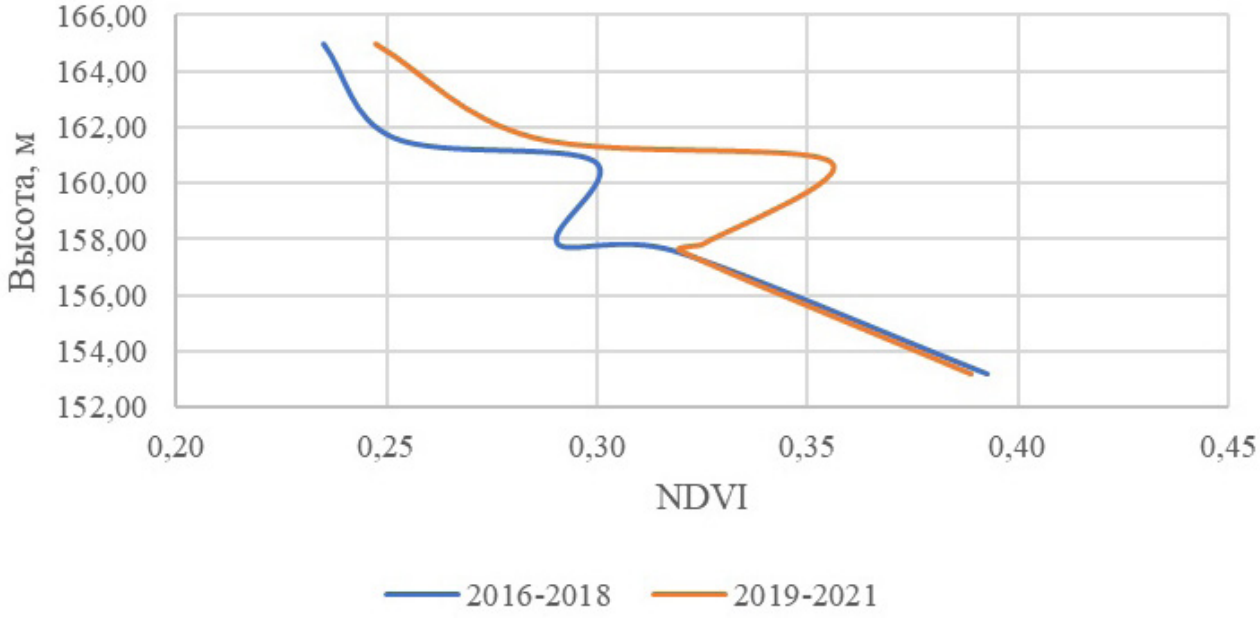


Рисунок 4.66. Изменение значений NDVI за период с 2016 по 2018 гг. и с 2019 по 2021 гг. от подножия склона к вершине по линии профиля 1

ГЛАВА 5

Факторная энтропия низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов

На территории Карадагского заповедника на ключевых участках пушистодубового и можжевелового 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, демонстрирующая сложность изучаемой территории по представленным признакам, как показатель формирования стратегий развития или стабилизации ландшафтов при изменении характера кронового рельефа и количества солнечной радиации во времени.

Из-за сезонной смены состояния кроны деревьев существенно изменяются морфометрические характеристики кронового рельефа, в том числе и распределение фиксируемых прибором экспозиции и уклонов.

Т. А. Огнева (1967), В. О. Смирнов (2009), В. А. Боков и Р. В. Горбунов (2011), Р. В. Горбунов (2011a, 2011b) в своих работах описывали роль экспозиций склонов в формировании микроклиматических условий, что подтверждает важность изучения сезонной динамики формируемого лесом кронового рельефа.

В можжевеловом лесу показатель энтропии экспозиции склонов кронового рельефа уменьшается к лету, то есть происходит уравновешивание распределения экспозиций с развитием кроны широколиственных деревьев. При этом неравномерное распределение экспозиций в весенний период сменяется преобладанием юго-восточных и южных склонов летом, согласно экспозиции склона земной поверхности. В пушистодубовом лесу, наоборот, отмечается увеличение значений энтропии к летнему периоду. Со сменой сезонов выявлен переход из пространства с относительно равномерным распределением экспозиций склонов в рельеф с преобладанием северо-восточной и восточной экспозицией, что также соответствует направлению склона земной поверхности. Таким образом, через энтропию демонстрируется усложнение показателя экспозиции (таблица 5.1).

Таблица 5.1. Значения показателей энтропии в пушистодубовом и можжевеловом лесах в весенний и летний периоды

	Энтропия по Шеннону			
	Пушистодубовый лес	**Можжевеловый лес**	**Пушистодубовый лес**	**Можжевеловый лес**
	Весенний период		**Летний период**	
1	**2**	**3**	**4**	**5**
Поступление солнечной радиации в 9:00	0,222	0,185	0,248	0,323
Поступление солнечной радиации в 12:00	0,202	0,19	0,214	0,210

Окончание таблицы 5.1.

1	2	3	4	5
Поступление солнечной радиации в 15:00	0,232	0,199	0,29	0,212
Поступление солнечной радиации в 17:00	0,193	0,143	0,32	0,322
Поступление солнечной радиации за сутки	0,297	0,274	0,264	0,239
Экспозиция	0,28	0,374	0,348	0,334
Крутизна	0,012	0,027	0,36	0,4
NDVI	0,191	0,326	0,134	0,356

В условиях лиственных пород деревьев зимой отсутствие кроны позволяет фиксировать стволы и ветви деревьев, которые также идентифицируются приборами как поверхности с определенной экспозицией, что в зимний период способствует равномерному распределению данного показателя. А в летний период при развитии кроны формируемый крановый рельеф не только перераспределяет экспозиции согласно направлению роста листвы, но и сохраняет общий характер относительно склона земной поверхности.

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 счёт сформированной кроны фиксируемый рельеф сглаживается. Более ярко данная ситуация проявляется в пушистодубовом лесу, как полностью лиственном, а в можжевеловом вечнозеленом лесу в меньшей степени за счёт отдельных лиственных деревьев и кустарников.

При рассмотрении значений факторной энтропии по распределению NDVI выделяется разница между значениями пушистодубового и можжевелового лесов. Относительно высокие показатели в можжевеловом лесу демонстрируют равномерное распределение количества значений по выделенным контурам, в то время как в пушистодубовом лесу большая часть располагается в среднем диапазоне значений. При сезонном рассмотрении в пушистодубовом лесу отмечается превышение весенних значений энтропии над летними на 0,07, что обозначает более сложную организацию в весеннее время и стабилизацию летом. В можжевеловом лесу обратная ситуация: летнее значение энтропии превышает весеннее на 0,03, демонстрируя небольшое усложнение распределения параметра NDVI в пространстве.

Значения энтропии поступления солнечной радиации на поверхность крон и на не закрытые ими участки рассчитывалась как для суток в целом, так и для часовых периодов, что позволило проследить изменения в течение светового дня. Утром в 9 часов на территории КЛЭС в весенний период характерно большое количество затененных участков, а летом отмечается более сложное распределение без четкой закономерности. Это отражается в увеличении энтропии с 0,22 до 0,25. Для можжевелового леса в данное время характерна сильная затененность за счет рельефа, что определяет значительное количество низких значений поступающей солнечной радиации. При этом в летний период отмечается меньший разброс значений и более равномерное их распределение. В связи с этим при смене сезонов происходит увеличение показателя энтропии до 0,32.

В полдень на стационаре в весенний период характерен большой диапазон значений с преобладанием низких значений, к лету формируется более сложная ситуация с преобладa-

нием высоких значений, значение энтропии увеличивается с 0,20 до 0,21, что демонстрирует усложнение характера распределения поступающей радиации. В можжевеловом лесу в рассматриваемый период также отмечается большая амплитуда значений. Характер распределения значений при смене сезонов сохраняется, но в летний период увеличивается диапазон значений, что приводит к увеличению энтропии с 0,19 до 0,21.

В 15-часовой период в пушистодубовом лесу также наблюдается изменение характера поступления солнечной радиации по сезонам. Весной характерно относительное равномерное распределение значений с пиком в теневых участках. Летом пик сохраняется, но наблюдается постепенный рост площади с большим поступлением солнечной радиации. Значения энтропии в таких условиях увеличиваются с 0,23 до 0,29. В можжевеловом лесу характер распределения значений сохраняется с увеличением диапазона значений в летний период. Показатель энтропии увеличился с 0,20 до 0,21.

В 17-часовой период на обоих рассматриваемых участках в весенний период зафиксирован маленький диапазон значений с сильным преобладанием затененных участков, к летнему периоду диапазон значительно увеличивается. Таким образом, энтропия в пушистодубовом лесу возрастает с 0,19 до 0,32, и с 0,14 до 0,32 в можжевеловом, что указывает на усложнение структуры распределения солнечной радиации.

При рассмотрении дня в целом в пушистодубовом лесу в весенний период отмечается плавное уменьшение количества значений от минимума к максимуму, в летний период ситуация обратная и преобладают высокие значения поступающей радиации. Аналогичная ситуация отмечается и в можжевеловом лесу при смене сезонов. В обоих случаях происходит снижение энтропии на 0,03–0,04. Несмотря на обратную картину при рассмотрении отдельно часовых значений, рассмотрение суточных значений позволяет говорить о более равномерном распределении поступающей солнечной радиации. Данные значения указывают на то, что при смене сезонов за счет высоты солнца над горизонтом в летний период происходят процессы стабилизации.

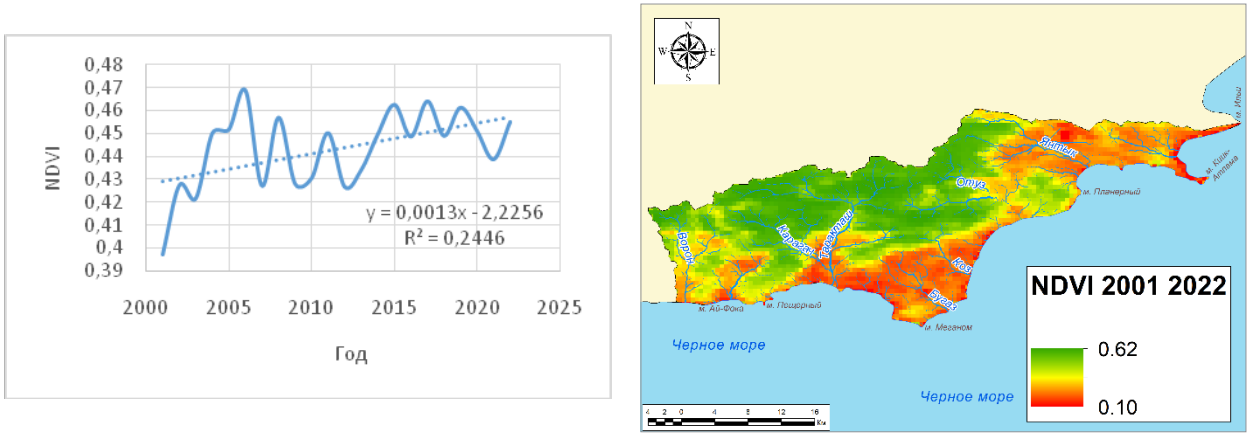
Таким образом, показатель энтропии демонстрирует сезонные изменения сложности распределения солнечной радиации, индекса NDVI, экспозиции и крутизны кронового рельефа, изменения которых влечет за собой изменение некоторых климатических параметров, таких как температура воздуха, почвы, количества испарения. 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.

ГЛАВА 6

Ландшафтные стратегии различных типов низкогорных субсредиземноморских лесных ландшафтов в современных условиях климатических изменений

6.1. Динамика значений NDVI в Юго-Восточном Крыму

В пределах Юго-Восточного Крыма наблюдается устойчивый рост значений вегетационного индекса NDVI с 2001 по 2022 гг. (рисунки 6.1, 6.2).



(a) (b)

Рисунок 6.1. Динамика среднегодовых значений вегетационного индекса NDVI в 2001–2022 гг. в Юго-Восточном Крыму: a) динамика среднегодовых значений; b) карта средних значений NDVI.

Как видно из рисунков 6.1 и 6.2, в пределах Юго-Восточного Крыма с 2001 по 2022 гг. наблюдается тенденция к росту значений вегетационного индекса и имеется положительный тренд на увеличение. Это говорит в первую очередь о том, что на рассматриваемой территории наблюдается рост количества зеленой фитомассы растительного покрова. На рисунке 6.2 более подробно представлено распределение среднегодовых значений вегетационного индекса в пределах основных типов растительного покрова. Наибольшие значения индекса NDVI характерны для скальнодубовых лесов, а наименьшие – для пушистодубовых редколесий.

За период с 2001 по 2022 гг. среднее значение NDVI в Юго-Восточном Крыму составило 0,443. Максимальные среднегодовые значения были зафиксированы в 2006 году и составляли 0,469, а минимальные – 0,397. Пространственное распределение значений NDVI в районе исследования с 2001 по 2022 год характеризуется диапазоном колебаний от 0,1 до 0,62. Если сравнивать полученные среднегодовые значения за каждый год со среднемноголетним значением, то отчетливо прослеживается тенденция к разбиению исследуемого временного

интервала на 2 периода – до 2014 года, когда превалировали среднегодовые значения NDVI меньше, чем среднемноголетние, и с 2014 года, когда среднегодовые значения NDVI стали больше среднемноголетних.

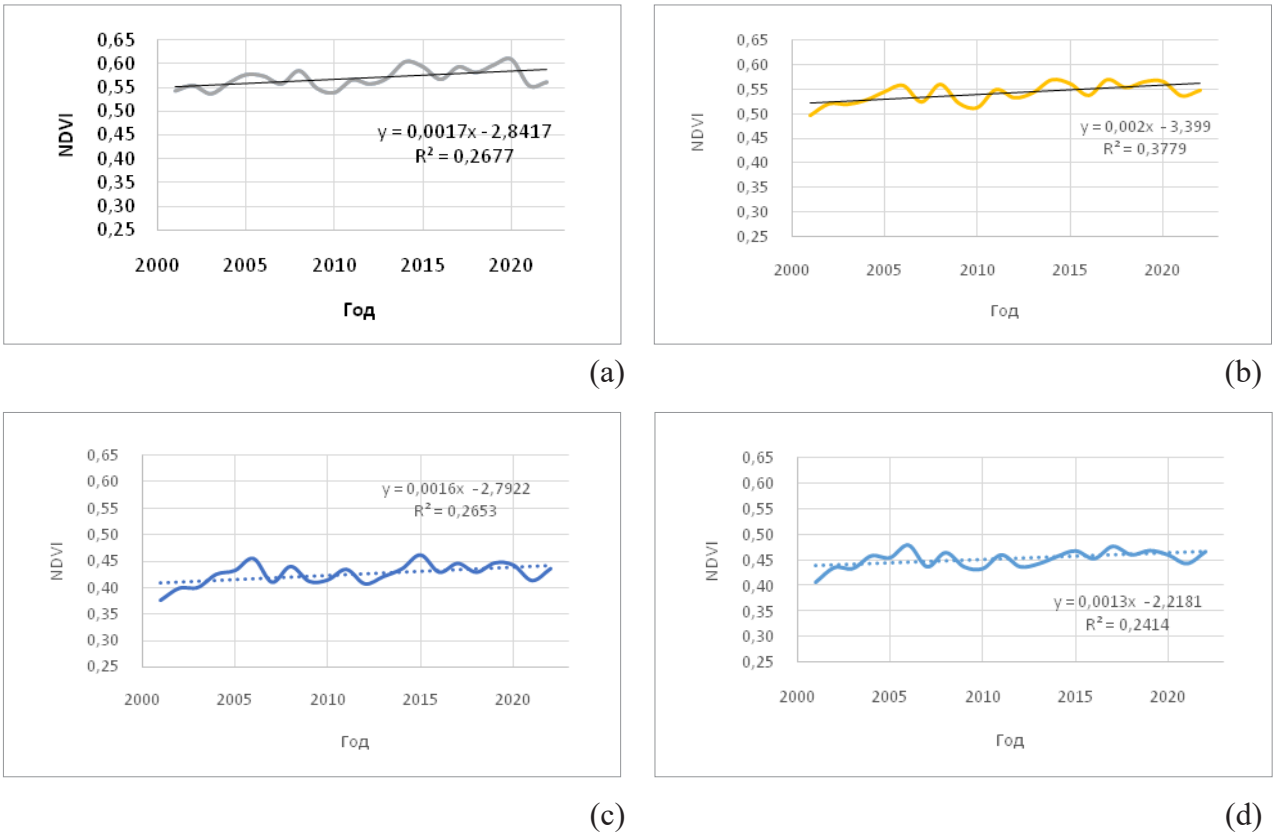


Рисунок 6.2. Динамика среднегодовых значений вегетационного индекса NDVI в 2001–2022 гг. в пределах основных растительных сообществ в Юго-Восточном Крыму: (a) скальнодубовые с участием грабовых и ясеневых лесов; (b) пушистодубовые леса и их производные из грабинника; (c) можжевеловые редколесья; (d) редколесья из дуба пушистого в комплексе с томиллярами и саванноидами.

В пределах можжевеловых редколесий среднее значение NDVI составляет 0,43; в пределах скальнодубовых лесов – 0,57; пушистодубовых лесов – 0,54; пушистодубовых редколесий – 0,45. Здесь также характерны положительные тренды направленности увеличения значений NDVI, причем наиболее четко они выражены в пределах пушистодубовых лесов.

В пределах Юго-Восточного Крыма максимальный пик вегетационной активности характерен для августа (Горбунов, 2022). На рисунке 6.3 представлены среднемесячные, максимальные и минимальные значения вегетационного индекса NDVI за август с 2001 по 2022 год.

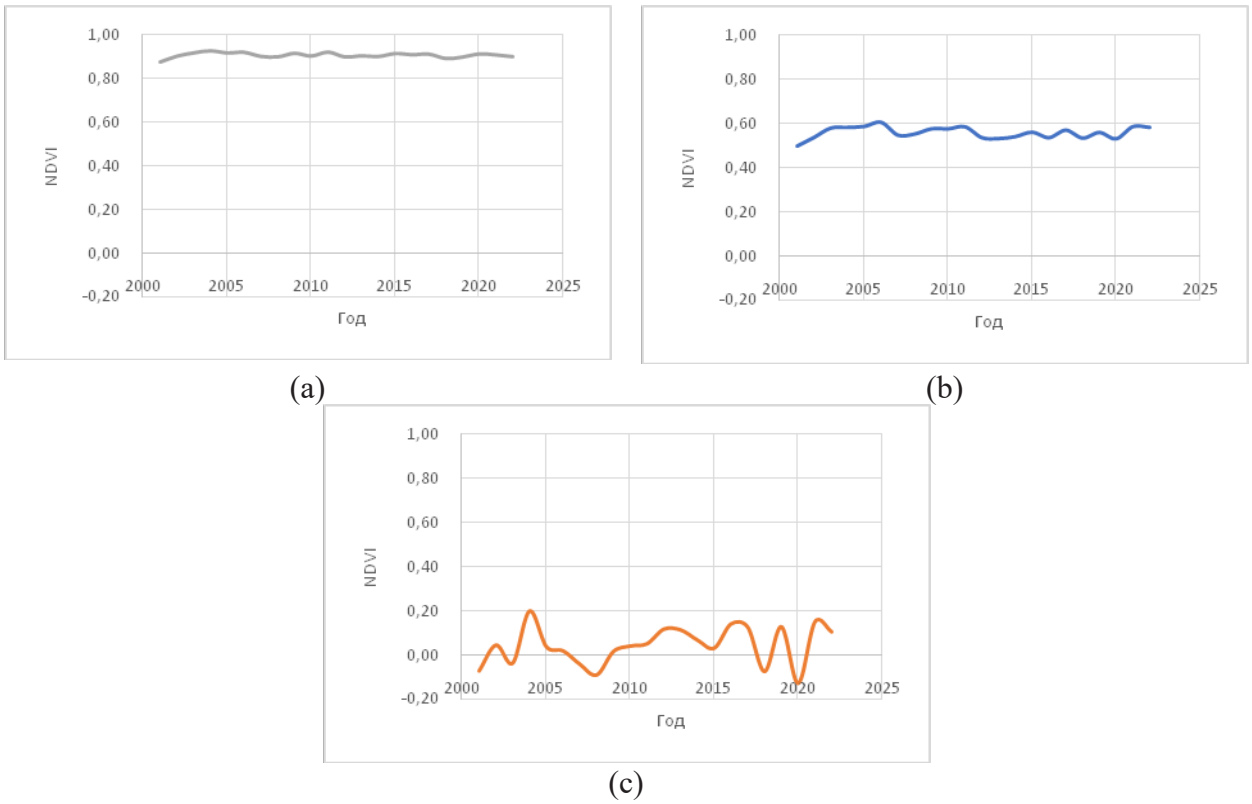


Рисунок 6.3. Значения NDVI в Юго-Восточном Крыму в августе:
(a) максимальные значения; (b) средние значения; (c) минимальные значения.

На рисунке 6.4 представлены минимальные, максимальные и средние значения вегетационного индекса NDVI в августе для различных растительных сообществ в Юго-Восточном Крыму.

График максимальных значений для большой по площади территории исследования сильно сглаживается и не позволяет установить пространственно-временные различия в исследуемой территории. В то же время при уменьшении исследуемых пространственных объектов и их площадей различия становятся более заметными и возможность использования максимальных данных возрастает, в то время как средние значения показывают различия и их можно анализировать и интерпретировать. Сглаживание графика максимальных значений достигается за счёт того, что он показывает максимальные значения единичных пикселей, которые могут пространственно находиться в различных частях исследуемого региона и не показывать всей реальной картины происходящих изменений. Схожая ситуация характеризует и распределение минимальных значений NDVI в августе, только здесь ситуация, наоборот, характеризуется значительным разбросом значений, что связано с тем, что отдельные пиксели изображения характеризуются отрицательным значением NDVI. Таким образом, получается, что использование для анализа максимальных и минимальных значений практически ограниченно допустимо, но их нужно применять с учетом количества минимальных и максимальных пикселей изображения в пределах исследуемого участка территории. Использование минимальных значений мы не использовали сразу, так как в силу особенностей территории минимальные значения могут содержать отрицательные значения NDVI из-за наличия водных объектов и динамики береговой линии моря. Анализ всех значений NDVI, встречающихся в пределах территории исследования, показывает, что для отдельных лет на минимальные и отрицательные значения приходится только менее 0,1% всех данных. Схожая картина и с распределением максимальных значений. Мы проанализировали значения NDVI > 0.9 и установили, что для большинства лет эти значения или отсутствуют, или составляют менее 0,5%

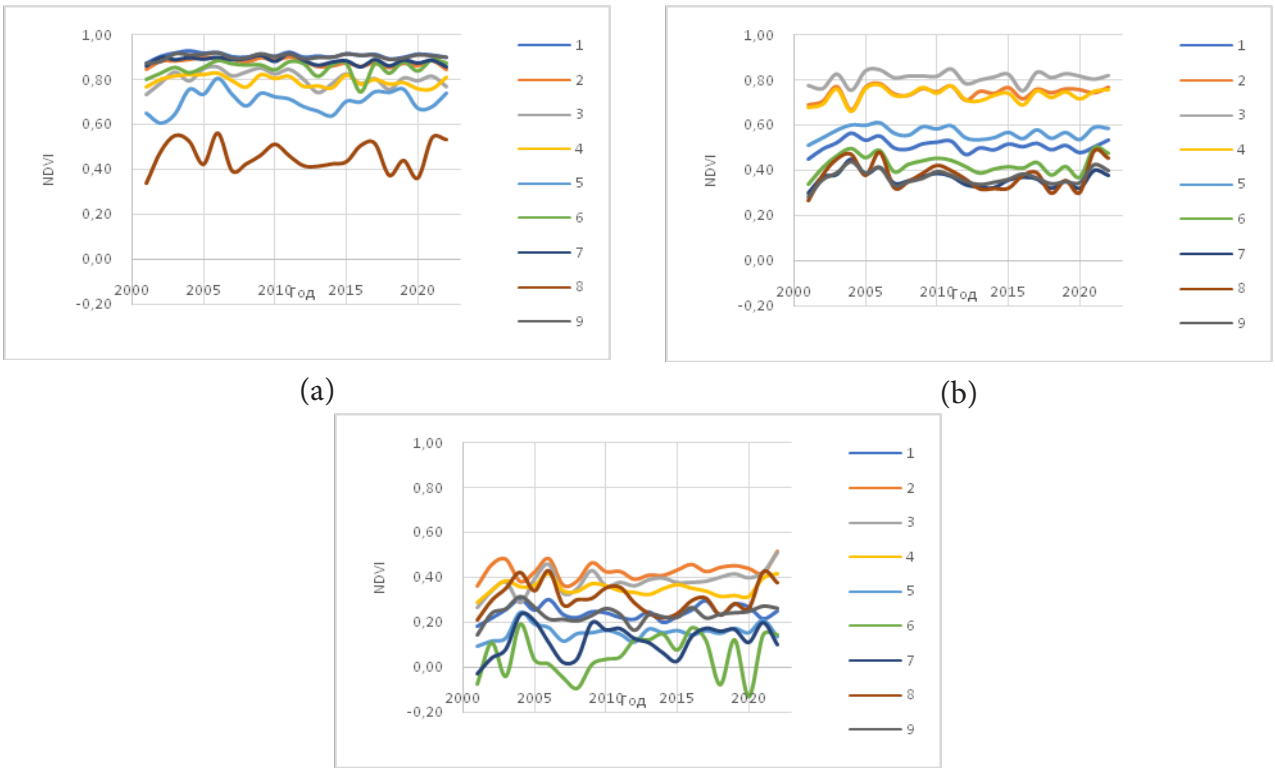


Рисунок 6.4. Значения NDVI в пределах растительных сообществ Юго-Восточного Крыма в августе: (a) максимальные значения; (b) средние значения; (c) минимальные значения (цифрами на графиках обозначены: 1 – можжевеловые редколесья; 2 – буковые леса с участием клёна Стевена; 3 – скальнодубовые с участием грабовых и ясеневых лесов; 4 – пушистодубовые леса и их производные из грабинника; 5 – редколесья из дуба пушистого в комплексе с томиллярами и саванноидами; 6 – разнотравно-ковыльные настоящие степи предгорий; 7 – сады и виноградники на месте пушистодубовых лесов и разнотравно-ковыльных настоящих степей; 9 – сельскохозяйственные угодья зерновых, пропашных культур на месте разнотравно-ковыльных степей и пушистодубовых лесов).

всех данных. В то же время информация о минимальных и максимальных значениях может быть полезна для выявления отдельных очагов роста или спада, однако они не могут дать представления о динамике растительности и всей картины функционирования сразу.

Таким образом, в исследовании мы опирались на использование средних значений NDVI, так как минимальные и максимальные значения являются единичными, составляют малую долю анализируемой выборки и не могут целостно характеризовать исследуемую территорию Юго-Восточного Крыма.

6.2. Тренд NDVI

В пределах территории Юго-Восточного Крыма наблюдается значительная пространственно-временная дифференциация не только самих значений NDVI, но и направленности трендов их изменения. На рисунке 6.5 показан анализ трендов изменения NDVI за весь период с 2001 по 2022 гг. и с разбивкой на пятилетние периоды.

Как видно из рисунка 6.5a, за период с 2001 по 2022 гг. в целом наблюдается положительный тренд изменения значений NDVI, что свидетельствует об увеличении количества зеленой фитомасы растений. В то же время отрицательный тренд был в отдельных участках рядом

с городами Судаком и Феодосией. Если рассмотреть пространственно-временную динамику за пятилетние периоды (рисунок 6.5b–6.5f), то можно отметить, что в пределах каждой ячейки пространства (пикселя) формируется довольно сложная картина. В период с 2001 по 2004 гг. наблюдались заметный спад количества зеленой фитомассы и снижение количества зеленой фитомасы растительного покрова в центральной, северной и северо-западной частях Юго-Восточного Крыма. В период с 2005 по 2009 гг. в этих районах формируются условия для роста растительности, о чём свидетельствуют положительные значения тренда NDVI, а в районах, где в 2001–2004 гг. наблюдались условия улучшения факторов среды для произрастания растительности, в 2005–2009 гг. наблюдаются условия, приводящие к снижению зеленой фитомассы растений. В 2010–2014 гг. ситуация чрезвычайно схожа с ситуацией в 2001–2004 гг.

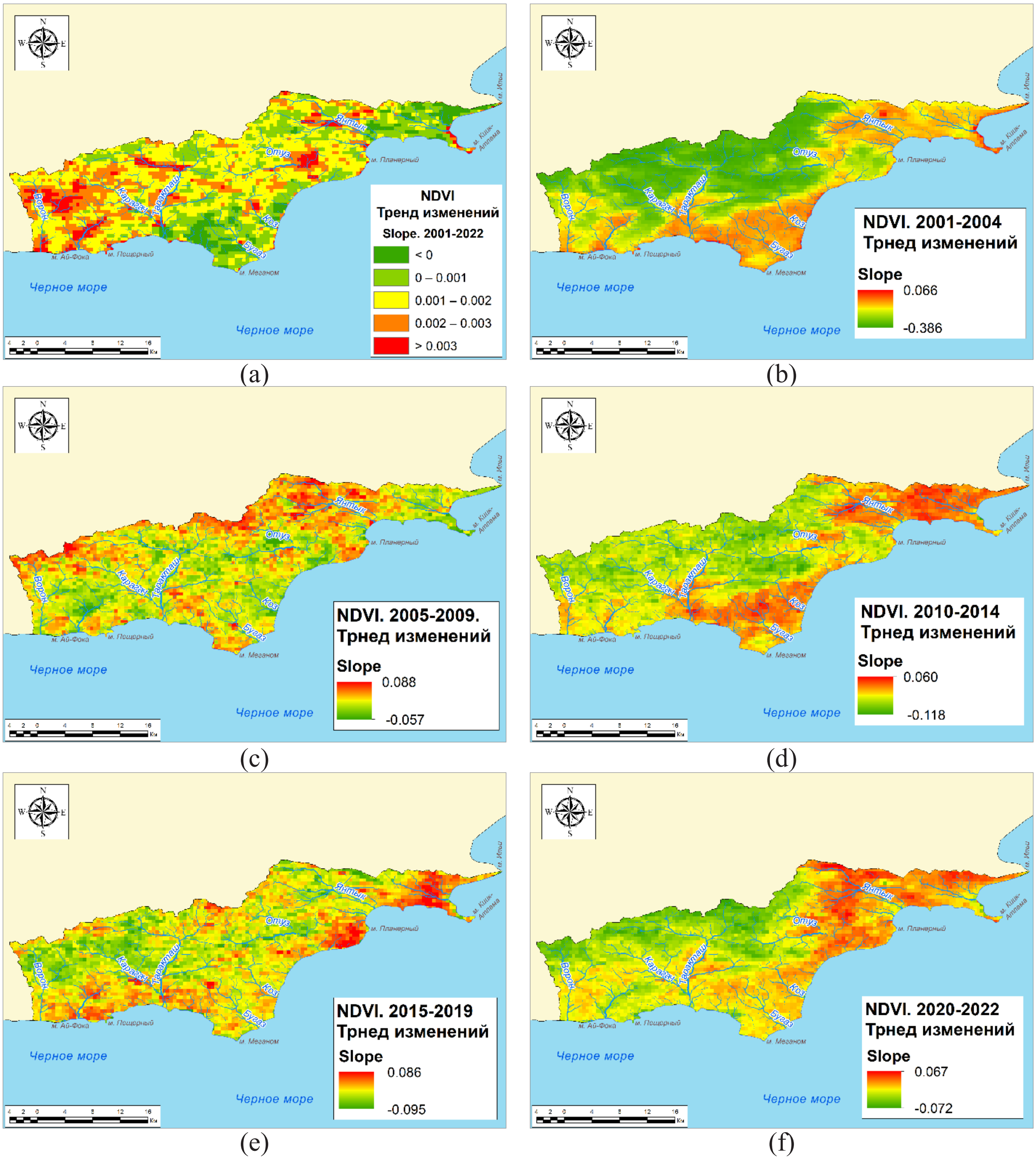


Рисунок 6.5. Тренд значений NDVI: (a) 2001–2022; (b) 2001–2004; (c) 2005–2009; (d) 2010–2014; (e) 2015–2019; (f) 2020–2022.

С 2015 по 2019 гг. наблюдаются усложнение картины роста и уменьшение растительности, однако в целом ситуация схожа с периодом 2005–2009 гг. Можно отметить, что начиная с 2015 года наблюдаются отрицательные тренды изменения NDVI в западной и северо-западной частях Юго-Восточного Крыма и формируется тенденция, направленная на сокращение количества зеленой фитомассы растительности. В связи с этим можно выделить квазипятилетние циклы, изменения растительного покрова в Юго-Восточном Крыму. Если рассматривать средние значения тенденции изменения NDVI (NDVI Trend) в основных растительных сообществах, то можно отметить, что в целом по каждому сообществу наблюдается или рост растительности, или практическая неизменность (таблица 6.1).

Таблица 6.1. Среднемноголетние значения изменения трендов в пределах растительных сообществ Юго-Восточного Крыма в 2001–2022 гг.

Тип растительных сообществ	Slope		
	Минимум	Максимум	Среднее
Можжевеловые редколесья	–0,0012	0,0060	0,0015
Буковые леса с участием клена Стевена	0,0000	0,0040	0,0014
Скальнодубовые с участием грабовых и ясеневых лесов	–0,0007	0,0050	0,0010
Пушистодубовые леса и их производные из грабинника	0,0000	0,0040	0,0014
Редколесья из дуба пушистого в комплексе с томиллярами и саванноидами	–0,0020	0,0050	0,0010
Разнотравно-ковыльные настоящие степи предгорий	–0,0020	0,0103	0,0010
Сады и виноградники на месте пушистодубовых лесов и разнотравно-ковыльных настоящих степей	–0,0030	0,0050	0,0003
Сельскохозяйственные угодья зерновых, пропашных культур на месте разнотравно-ковыльных степей и пушистодубовых лесов	–0,0010	0,0030	0,0011
Урбоценозы населенных пунктов	–0,0020	0,0050	0,0010

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 экосистемы антропогенно созданных растительных сообществ (садов и виноградников), так как на всём протяжении своего существования они поддерживаются искусственно в результате деятельности человека.

6.3. Коэффициент вариации

Рассмотрим более подробно изменение коэффициента вариации значений NDVI в Юго-Восточном Крыму (рисунок 6.6).

Оценка коэффициента вариации значений NDVI позволила выделить наиболее стабильные и сильно изменяемые значения NDVI в Юго-Восточном Крыму. Как видно из рисунка 6.6, большая часть исследуемого региона характеризуется стабильным распределением значений NDVI. Незначительные и сильные изменения характерны для южной и юго-восточной частей исследуемого региона.

В таблице 6.2 представлены изменения значений коэффициента вариации NDVI в пределах растительных сообществ Юго-Восточного Крыма в 2001–2022 гг.

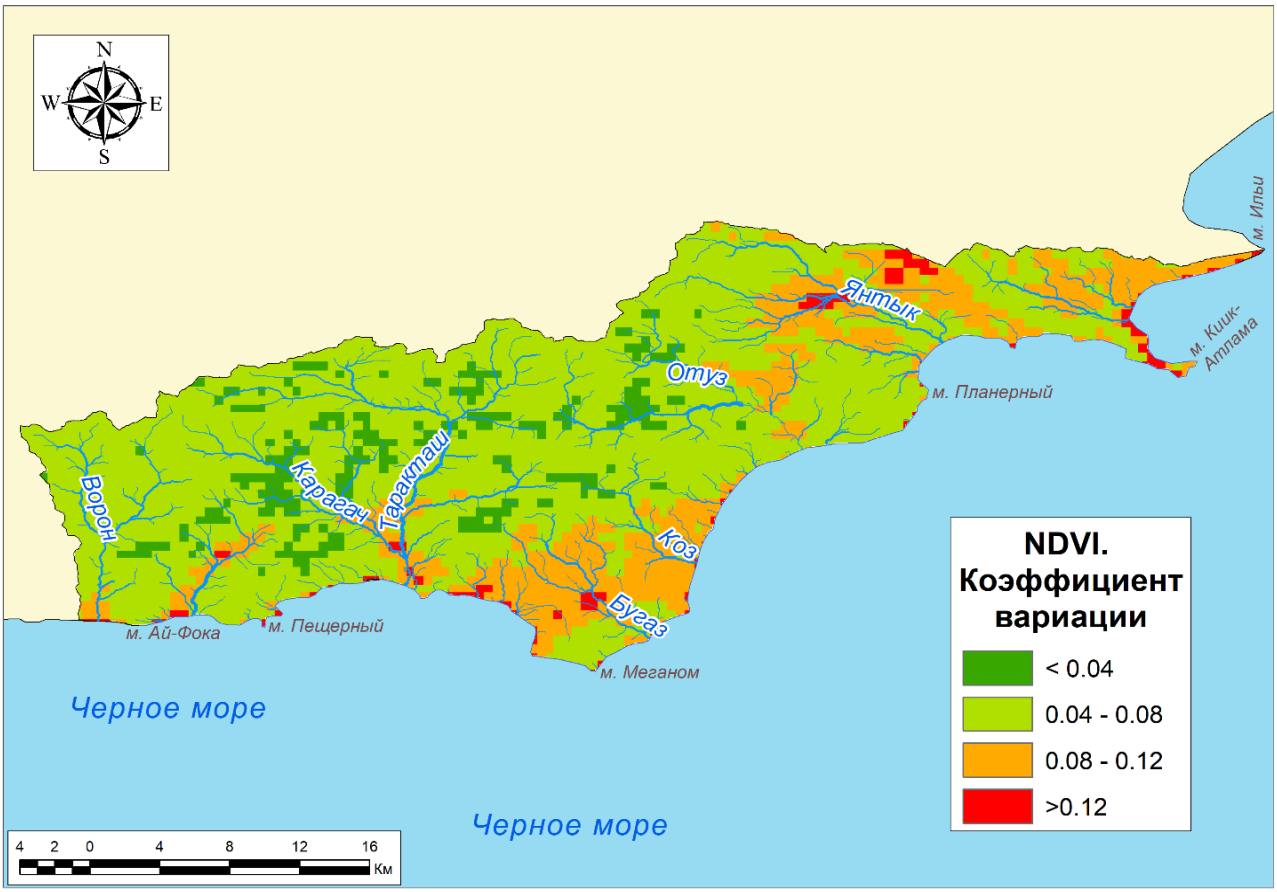


Рисунок 6.6. Коэффициент вариации NDVI в Юго-Восточном Крыму

Таблица 6.2. Среднемноголетние значения изменения трендов в пределах растительных сообществ Юго-Восточного Крыма в 2001–2022 гг.

Тип растительных сообществ	CV		
	Мин.	Макс.	Ср.
Можжевеловые редколесья	0,04	0,21	0,06
Буковые леса с участием клёна Стевена	0,04	0,07	0,05
Скальнодубовые с участием грабовых и ясеневых лесов	0,03	0,09	0,05
Пушистодубовые леса и их производные из грабинника	0,03	0,09	0,05
Редколесья из дуба пушистого в комплексе с томиллярами и саванноидами	0,03	4,43	0,06
Разнотравно-ковыльные настоящие степи предгорий	0,04	2,90	0,08
Сады и виноградники на месте пушистодубовых лесов и разнотравно-ковыльных настоящих степей	0,03	0,44	0,08
Сельскохозяйственные угодья зерновых, пропашных культур на месте разнотравно-ковыльных степей и пушистодубовых лесов	0,06	0,13	0,09
Урбоценозы населенных пунктов	0,04	0,19	0,08

Как видно из таблицы 6.2 и рисунка 6.6, наиболее стабильными выступают значения экосистем лесов, по сравнению с экосистемами степей и антропогенно созданных сельскохозяйственных угодий и населенных пунктов.

6.4. Индекс Херста

Наиболее полно оценить изменчивость растительности и дать оценку прогнозным изменениям позволяет индекс Херста (HurstIndex). На рисунке 6.7 исследуется пространственное разнообразие значений индекса Херста в Юго-Восточном Крыму, а в таблице 6.3 предоставлена подробная информация о минимальных, максимальных и средних значениях индекса Херста, относящихся к основным растительным сообществам в том же регионе.

Установлено, что диапазон значений индекса Херста варьирует от 0,49 до 0,96, с рассчитанным средним значением 0,75.

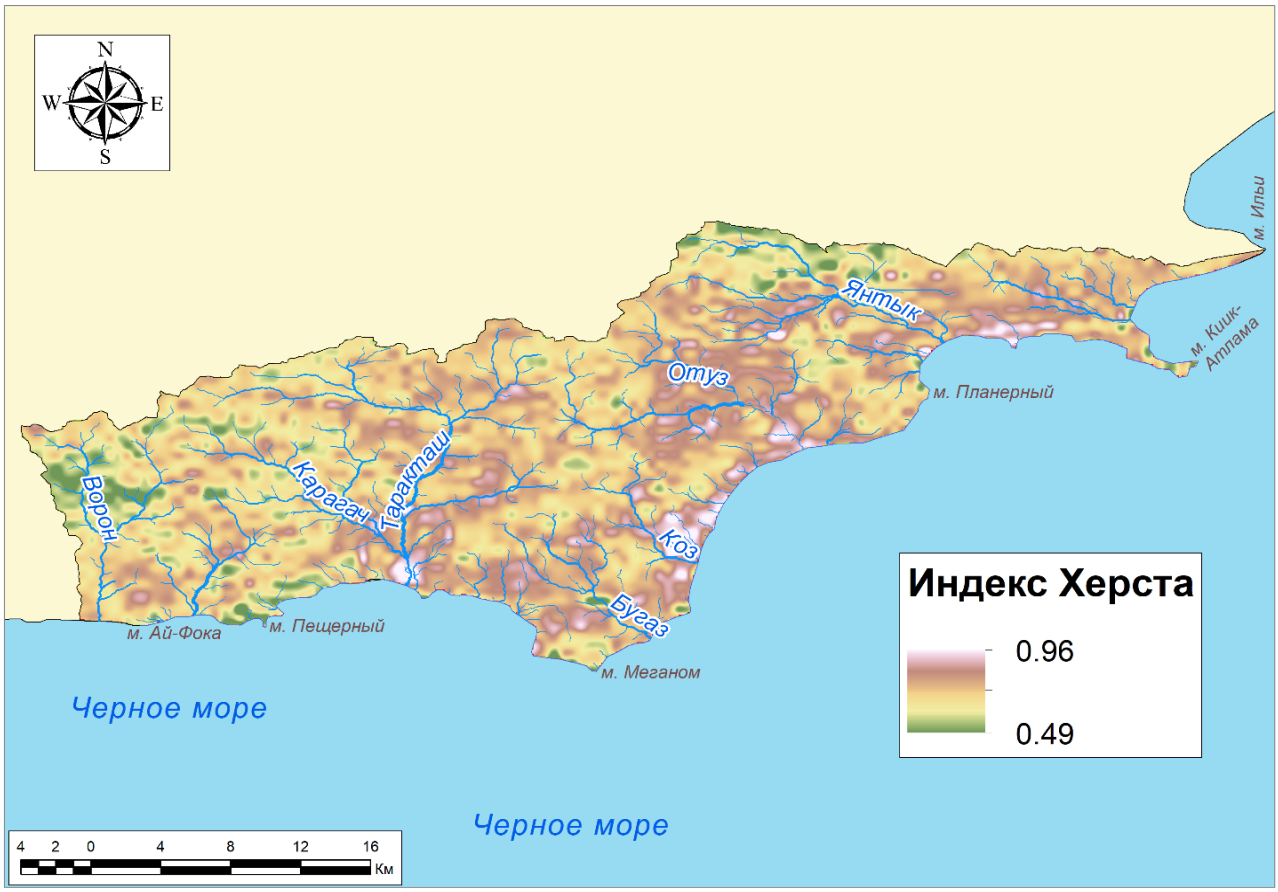


Рисунок 6.7. Значение индекса Херста в Юго-Восточном Крыму

Таблица 6.3. Значения индекса Херста (HurstIndex) в пределах растительных сообществ Юго-Восточного Крыма в 2001–2022 гг.

Тип растительных сообществ	Индекс Херста		
	Мин.	Макс.	Ср.
1	2	3	4
Можжевеловые редколесья	0,49	0,85	0,73
Буковые леса с участием клёна Стевена	0,58	0,84	0,71
Скальнодубовые с участием грабовых и ясеневых лесов	0,58	0,87	0,74
Пушистодубовые леса и их производные из грабинника	0,59	0,88	0,74
Редколесья из дуба пушистого в комплексе с томиллярами и саванноидами	0,56	0,93	0,76

Окончание таблицы 6.3.

1	2	3	4
Разнотравно-ковыльные настоящие степи предгорий	0,54	0,94	0,76
Сады и виноградники на месте пушистодубовых лесов и разнотравно-ковыльных настоящих степей	0,59	0,93	0,77
Сельскохозяйственные угодья зерновых, пропашных культур на месте разнотравно-ковыльных степей и пушистодубовых лесов	0,65	0,87	0,74
Урбоценозы населенных пунктов	0,61	0,94	0,78

Диапазон значений индекса, рассчитанных для данных NDVI, проявляет выраженную пространственную гетерогенность. Наименьшие значения индекса Херста 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.

6.5. Влияние климатических факторов на изменение NDVI 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 (рисунок 6.8).

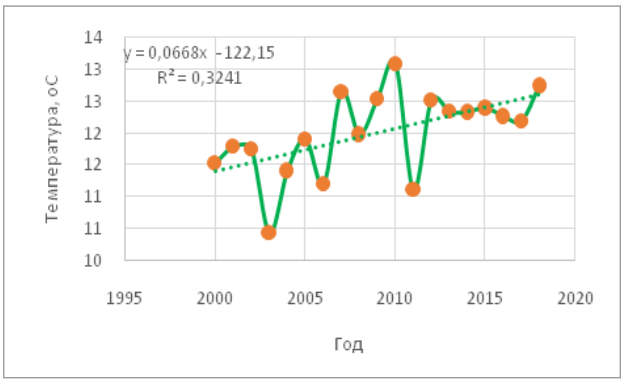
Как видно из рисунка 6.8, в Юго-Восточном Крыму наблюдается рост температуры воздуха и поступления солнечной радиации и незначительное сокращение количества выпадающих осадков. Наблюдается высокий коэффициент корреляции между значениями количества осадков и значениями NDVI. Коэффициенты корреляции между значениями NDVI и температурой воздуха, NDVI и количеством солнечной радиации характеризуются как среднезначимые.

6.6. Некоторые теоретические аспекты исследования ландшафтных стратегий

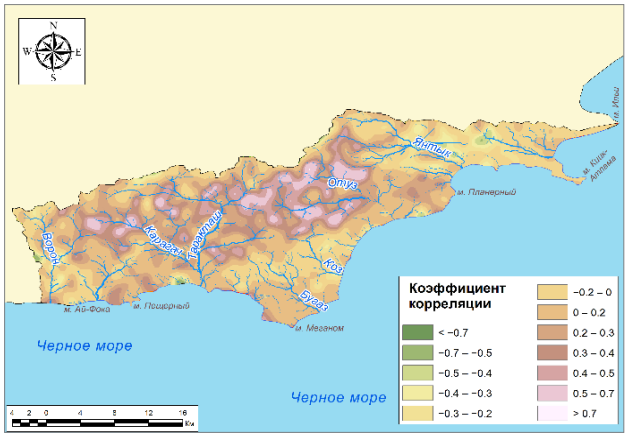
Исследование изменения растительности является чрезвычайно важной задачей, так как растительный покров реагирует одним из первых на многие реакции окружающей внешней среды. Особенно это важно исследовать в регионах, в которых произрастают леса как один из ценнейших ресурсов для развития различных сфер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

В отличие от ряда опубликованных работ (Kang et al., 2021; Han et al., 2022; Wang et al., 2023) в пределах Юго-Восточного Крыма не наблюдается больших различий амплитуд в диапазоне значений NDVI. Это связано в первую очередь с меньшей площадью исследования по сравнению с регионами, описываемыми в работах (Fan et al., 2015; Wang et al., 2023), и большой долей покрытия естественной растительностью в отличие от регионов с сильно контрастным и отсутствующим растительным покровом.

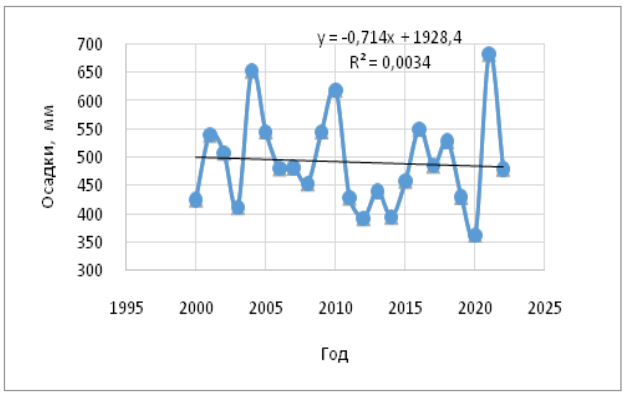
Несмотря на тот факт, что исследованию динамики NDVI для территории Крымского полуострова и его частей посвящены отдельные работы (Lupyan et al., 2019; Tabunshchik, 2019; Shadchinov, 2021), Юго-Восточный Крым мало исследован. Стоит также отметить, что имеются работы по оценке динамики растительности (Gorbunov, 2020). D. Fan et al. (2020) приводят расчеты изменения NDVI и его изменения для Крымского полуострова в рамках



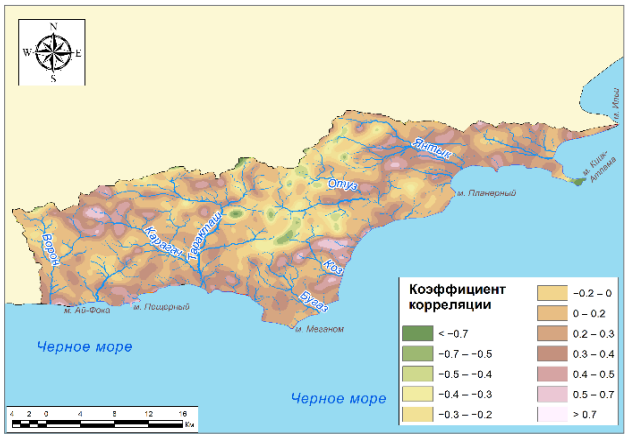
(a)



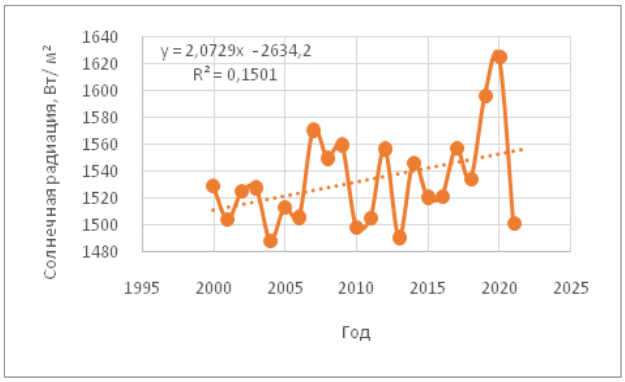
(b)



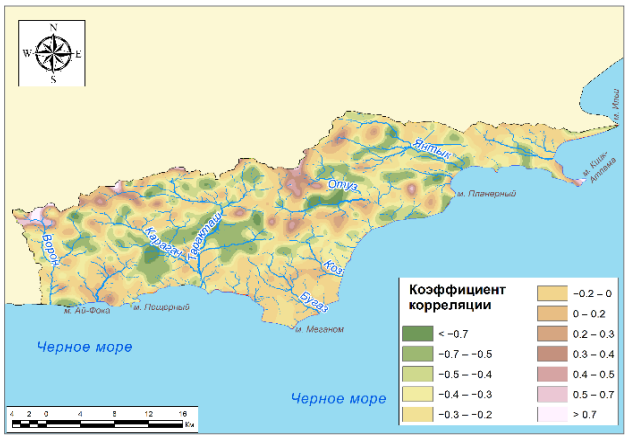
(c)



(d)



(e)



(f)

Рисунок 6.8. Связь между температурой воздуха, количеством выпадающих осадков, солнечной радиацией и NDVI: (a) динамика изменения среднегодовых значений температуры воздуха в Юго-Восточном Крыму; (b) коэффициент корреляции между среднегодовыми значениями NDVI и температуры воздуха; (c) динамика изменения среднегодового количества выпадающих осадков в Юго-Восточном Крыму; (d) коэффициент корреляции между среднегодовыми значениями NDVI и количеством выпадающих осадков; (e) динамика изменения среднегодовых значений солнечной радиации в Юго-Восточном Крыму; (f) коэффициент корреляции между среднегодовыми значениями NDVI и поступлением солнечной радиации.

изучения изменений растительности в районе инициативы «Один пояс – Один путь» с 1982 по 2015 гг., но сравнить эти данные с полученными нами не предоставляется возможным в силу разных пространственных масштабов исследования.

Если говорить о сравнении полученных значений индекса Херста для Юго-Восточного Крыма с другими регионами мира, то можно сказать, что, как и в Тибетском автономной районе (Китай) (Wang et al., 2023), во Внутренней Монголии (Китай) (Kang et al., 2021) превалируют значения менее 0.5. В то же время значения индекса Херста (<0.4) показали, что в пределах пушистодубовых лесов в пределах Карадагского заповедника наблюдаются отдельные очаги сильной антиусточивости, что подтверждается в ранее опубликованных нами данных (Gorbunov et al., 2022). В противовес этому очаги неустойчивости тяготеют в большинстве своём к границам урбоценозов населенных пунктов, что связывается в первую очередь с негативным воздействием антропогенной деятельности. В целом исследование динамики изменения и трендов изменения NDVI позволяет выявить наиболее и наименее подверженные изменениям земли и лесные экосистемы. В то же время имеются некие сложности с выделением классов и границ по сравнению с ранее опубликованными работами (Han et al., 2022; Jiang et al., 2022). Так, в нашем исследовании мы можем использовать не все варианты классификации, представленные в (Han et al., 2022; Jiang et al., 2022).

Наибольшие значения корреляции между растительным покровом и количеством выпадающих осадков, температурой воздуха и количеством солнечной радиации характерны для лесных экосистем, что связано с наиболее благоприятными условиями произрастания лесов. В то же время пушистодубовые леса, находясь на границе ареала своего существования, испытывают негативные пессимальные условия внешней среды и не могут формировать полный бонитет с наиболее обильным значением зеленой фитомассы. Это частично подтверждает предположения, высказанные в работах (Научно-прикладные основы создания…, 2000; Современные ландшафты Крыма…, 2009), о том, что в Горном Крыму, где преобладают лесные ландшафты, сформировано ядро наиболее ценных лесов, находящихся в оптимальных условиях существования в пределах Крымского полуострова, и по мере отдаления от Горного Крыма начинают преобладать пессимальные условия внешней окружающей среды, что неблагоприятно сказывается на лесных ландшафтах.

В то же время полученные нами данные тесно связаны с данными, полученными Han et al. (2022) в провинции Аньхой (Китай) о том, что за рассматриваемый период рубеж 2014/15 гг. является моментом, когда происходит смена направленности трендов изменения значений NDVI. Однако, если Han et al. (2022) связывают это с ростом катастрофических природных явлений (особенно оползней и лавин), для территории Юго-Восточного Крыма это не характерно. Здесь большую силу играют фактор антропогенного воздействия и глобальные циркуляционные процессы.

Мы исходим из предположения, что, рассматривая регион, покрытый растительностью, значения NDVI не могут быть отрицательными (как для водной поверхности), и мы можем анализировать средние значения. В то же время из-за ограничений размера пикселя исходного космического снимка мы понимаем, что в него могут попадать водные объекты, которые также подвержены изменению границ в результате природных и антропогенных факторов, что особенно актуально для Крымского полуострова (Shinkarenko et al., 2021). Однако в исследуемом регионе влияние на расчет значений показателя NDVI незначительно, так как регион относится к вододефицитным (Gorbunov et al., 2022) и имеет большое количество природных ландшафтов, в которых отсутствуют как природные водные объекты, так и созданные в результате антропогенной деятельности. Показанный в разделе 3.1 анализ среднегодовых значений NDVI не дает четкого представления о тенденциях изменений, и необходимо использовать более сложные показатели для оценки изменения растительного покрова. Как показали расчет значений идекса Херста и прогноз тренда изменений, эти показатели хорошо справляются с поставленной задачей. Таким образом, индекс Херста является полезным ин-

струментом для анализа будущих изменений в региональном NDVI. Он позволяет определить степень устойчивости или антиустойчивости будущих тенденций и помогает предсказывать долгосрочные изменения в растительном покрове.

Вопрос о выборе ведущего фактора или комплекса факторов, которые влияют на произрастание растительности в пределах того или иного исследуемого региона, является важной и до сих пор не решенной проблемой. Очевидно, что рассмотренные нами климатические факторы – температура, количество осадков и поступление солнечной радиации – вносят весомый вклад в функционирование раздельных сообществ в Юго-Восточном Крыму, но не являются единственными. Перспективным направлением исследований выступает поиск и анализ различных факторов внешней среды, оказывающих влияние на функционирование растительных сообществ. Чрезвычайно актуальным является использование для этих целей концепции многомерной экологической ниши в трактовке G. E. Hutchinson (1957). В то же время наш анализ исследовал исключительно влияние трёх климатических факторов на изменение растительности. Учитывая сложное воздействие климатических переменных на развитие и функционирование экосистем и ландшафтов, крайне важно, чтобы будущие исследования включали в себя более обширный набор внешних факторов. Это расширение должно охватывать не только климатические переменные, но также различные другие элементы внешней среды.

Если подходить к вопросу о выборе вегетационных индексов, пригодных для оценки динамики растительного покрова, то использование NDVI имеет гораздо большее применение и использование по сравнению с другими вегетационными индексами. Выбор вегетационного индекса NDVI был обусловлен в первую очередь его широким использованием и возможностью сравнения получаемых исследователями данных между собой. Большинство исследователей отмечают (Yang et al., 2019; Han et al., 2022; Jiang et al., 2022), что NDVI может лучше отражать состояние роста растительности с его высокой чувствительностью к растительности; поэтому он обычно используется в качестве эффективного оценочного индекса для мониторинга региональных экосистем. P. Li et al. (2021) говорят о том, что среди всех вегетационных индексов NDVI имеет хорошую корреляцию с чистой первичной продуктивностью растительности (NPP), площадью покрытия полога и биомассой, что в свою очередь позволяет использовать его для точного отражения и оценки состояния роста растительности и широко используется в исследованиях динамики региональной растительной.

В то же время существует большое количество вегетационных индексов, которые могут быть рассчитаны на основе данных космической съемки. Например, RatioVegetationIndex (RVI) (Jordan, 1969), InfraredPercentageVegetationIndex (IPVI) (Crippen, 1990), TransformedVegetationIndex (TVI) (McDaniel, Haas, 1982) при расчетах связаны с NDVI, так как используют в своих расчетах те же каналы космических снимков, что и NDVI, и рассматривать их самостоятельно в отличие от NDVI не имеет смысла. Одно из преимуществ NDVI состоит в том, что его значения изменяются от –1 до 1, в отличие от RatioVegetationIndex (RVI) (Jordan, 1969), DifferenceVegetationIndex (DVI) (Richardson, Everitt, 1992), имеющих неограниченную размерность и сложность дальнейшего сравнения и интерпретации получаемых данных.

A. Huete et al. (1985), C. D. Elvidge and R. J. Lyon (1985) показали, что почвенный покров сильно влияет на вегетационные индексы. Однако в то же время нужно понимать, что абсолютно все вегетационные индексы чувствительны к влиянию почвенного покрова и открытых участков без растительности. Для рассматриваемого пикселя изображения NDVI может рассчитываться и включать почву и водные объекты. Однако при увеличении растительности в пределах этого пикселя возрастает и значение NDVI, так как растительность покроет участки почвы или появиться на месте бывших водных объектов. Существуют также вегетационные индексы, которые учитывают влияние почвенне и поверхности земли. К таким вегетационным индексам относятся Transformed Soil Adjusted Vegetation Index (TSAVI) (Baret et al.,

2005), Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI) (Qi et al., 1994), Enhanced Vegetation Index (EVI) (Huete et al., 2002). Однако их применение ограничивается в регионах с богатым растительным покровом, в том числе к которым относится исследуемый регион. Это объясняется невозможностью четко провести выделение почвенных констант (почвенных линий), которые подробно описываются в работе (Kauth et al., 1976). В этом случае самым лучшим будет использование NDVI, так как он лучше всего работает в областях с обильной растительностью, к которым относится Юго-Восточный Крым. Использование вегетационного индекса EVI было рассмотрено нами на подготовительном этапе работ, однако он содержал большое количество ошибок, что не позволило включить его в исследование. В то же время значения EVI, как показано в работе (Shibani et al., 2023), не коррелируют с другими значениями вегетационных индексов (в частности, с NDVI). Расчет вегетационного индекса EVI показал его большую чуствительность к рельефу, а учитывая, что изучаемый район обладает сложным пересеченным рельефом, то это приводило к большим ошибкам (Matsushita et al., 2007).

Использование вегетационных индексов с корректировкой на влияние почвенного покрова требует учета региональных особенностей, а также введения различных поправочных коэффициентов, которые не могут быть одинаковыми для всех ячеек растра в силу неоднородности почвенного и наземного покрова. В силу этого именно использование NDVI показывает наилучшие результаты для Крымского полуострова в целом и Юго-Восточного Крыма в частности (Горбунов, 2022; Вечерков и др., 2023; Tabunshchik, 2019). Влияние почвенных особенностей на локальном и региональном уровнях исследований требует больших трудозатрат и время затрат на проведение исследований по полевым и лабораторным исследованиям спектров почв. Подобные работы особенно часто проводятся для корректировки глобальных моделей и выявления региональных особенностей в различных науках, которые используют данные дистанционного зондирования Земли (Wu et al., 2019; Skorokhod et al., 2021).

Еще одним важным аспектом, который следует учитывать при анализе изменений значений NDVI и расчете индекса Хёрста, является преобразование временных рядов в стационарную форму. Это было необходимо из-за того, что одним из наиболее широко используемых методов расчета индекса Хёрста является анализ R/S. Как указано в работе M. Höll et al. (2016), в реальных данных мира природы часто содержатся встроенные тренды, которые делают временной ряд нестационарным, что делает анализ R/S неприменимым. Это происходит потому, что анализ R/S может быть применен к рядам, которые обладают определенной стационарностью по среднему значению (Kantelhardt, 2012). Кроме того, как указано в работе (Crevecoeur et al., 2010), важно учитывать, что для расчета индекса Хёрста длина наблюдательного ряда должна включать как минимум 256 измерений.

Еще одним из ограничений исследования выступает скудность данных и климатических характеристиках в пределах Юго-Восточного Крыма и сложности с их геопространственной обработкой. Мы полностью согласны с W. Han et al. (2022), которые указывают на тот факт, что при использовании различных методов интерполяции климатических данных могут быть получены различные растры полей значений климатических факторов.

Также нужно понимать, что в дальнейшем возможно использовать более детальные космические снимки с более крупным разрешением (Sentinel-2 с разрешением 10 м/пиксель) в отличие от использованных в работе MODIS. Однако использование космических снимков MODIS продиктовано в первую очередь их широким пространственно-временным охватом, при более худшем разрешении. В дальнейшем при росте частоты съемок различных спутников необходимо стремиться детализировать частоту получаемых данных и получать более качественные данные. Однако при этом должно быть улучшено качество предоставляемых открытых климатических данных, которые на данный момент пространственно сопоставимы только с космическими снимками MODIS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

Для характеристики формирования и функционирования субсредиземноморских горных лесных ландшафтов на топологическом уровне заложены две экспериментальные площадки – пушистодубовый лес на восточном склоне хребта Беш-Таш и можжевеловый лес на южном склоне хребта Карагач в пределах Карадагского природного заповедника.

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. Также 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 можжевеловых лесов.

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 можжевеловом лесах.

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 можжевеловом проявляется за счёт единичных лиственных деревьев.

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.

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

Среднегодовое количество осадков на территории Карадага за анализируемый период составило 448 мм; в последние годы зафиксировано уменьшение количества осадков. В среднем кроны сообществ дуба пушистого задерживают до 24% осадков. С точки зрения сезонной динамики максимальное задержание осадков (до 41%) приходится на период с поздней весны до начала лета; это связано с достижением максимальных объемов фитомассы в этот период. Согласно литературным данным, стволовой сток перекрывает 3–5% годового стока; только на более крутых склонах это может привести к негативным последствиям в виде плоскостного смыва почвы. Сток, образующийся из крон деревьев, достигает поверхности почвы постепенно, образуя запас влаги в лесной подстилке. За исследуемый период влажность почвы значительно снизилась в 1,6 раза. Максимальные значения относительной влажности почвы наблюдаются в зимние месяцы и в марте, когда среднее значение не опускается ниже 25%. Особенности рельефа Юго-Восточного Крыма создали условия для перераспределения твердых осадков (снега) с наветренных склонов с образованием снегосборных бассейнов. Благодаря этому эффекту склоны южных экспозиций характеризуются лучшим увлажнением, чем противоположные склоны северных экспозиций. Значения эвапотранспирации в пушистых дубравах приблизительно совпадают со значениями этого показателя в Средиземноморском регионе и составляют в среднем 450 мм в год. Межгодовая динамика демонстрирует тенденцию к увеличению показателей эвапотранспирации. Значительное увеличение суммарного испарения наблюдается в конце лета и начале осени. Наблюдения за склоновым стоком, проведенные на участках стока, показывают, что этот фактор существенно не влияет на конечное значение водного баланса. Среднее значение склонового стока составило 0,04 л/км^2; что касается межгодовой динамики, то за рассматриваемый период зафиксировано снижение этого значения. Полученные данные показывают, что водный баланс пушистодубовых лесов характеризуется отрицательными значениями, что связано в первую очередь с дефицитом влаги. Водный баланс имеет положительные значения только в зимние месяцы. Все проанализированные особенности элементов водного баланса формируют условия, способствующие вытеснению степных сообществ лесными видами, что подтверждается результатами полевых и дистанционных исследований.

Показатель энтропии демонстрирует сезонные изменения сложности распределения солнечной радиации, индекса NDVI, экспозиции и крутизны кронового рельефа, изменение 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 счёт высоты солнца над горизонтом в летний период происходят процессы стабилизации.

Растительный покров служит одним из основных показателей состояния окружающей среды и может предоставлять ценную информацию об общем состоянии экосистемы. Традиционно данные о растительном покрове могут использоваться при проведении оценки различных показателей состояния окружающей природной среды, скорости изменения антропогенной деятельности, при проведении оценки экосистемных услуг и функций лесных ландшафтов. Понимание динамики изменения растительного покрова жизненно важно для эффективного природоохранного планирования и сохранения видов, находящихся под угрозой исчезновения, принятия мер для устойчивого управления лесами и их защиты.

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 экосистемы лесов, по сравнению с экосистемами 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. Среднее значение индекса NDVI за период с 2001 по 2022 годы составило 0,443. Максимальные годовые значения были зафиксированы в 2006 году и достигали 0,469, в то время как минимальные значения составляли 0,397. Пространственное распределение NDVI в исследуемом районе в течение этого временного промежутка характеризовалось колебаниями от 0,1 до 0,62. Наибольшие значения положительных трендов изменчивости выявлены в ландшафтах, где преобладают мозаичные комплексы можжевеловых и дубовых лесов. Эти результаты указывают на формирование стратегий развития в общем контексте данных ландшафтов.

Наименьшие значения индекса Херста, рассчитанного на основании вегетационного индекса NDVI, преимущественно наблюдаются в северных и северо-западных частях Юго-Восточного Крыма, в то время как наивысшие значения преобладают в прибрежных, южных и юго-восточных частях Юго-Восточного Крыма. Высокие значения индекса Херста особенно выделяются вблизи населенных пунктов, таких как Щебетовка, Курортное, Судак, Солнечная Долина и другие. Для большей части территории Юго-Восточного Крыма характерны значения индекса Херста более 0,5, что свидетельствует о том, что тренд изменения зеленой фитомассы сохранит свою направленность на увеличение, и в целом система будет оставаться стабильной, и будут сформированы предпосылки для ландшафтной стратегии развития в пределах рассматриваемых можжевеловых и дубовых лесных ландшафтов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Агроклиматический справочник по Крымской области / Глав. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР ; Упр. гидрометеорол. службы УССР ; Крымское гидрометеобюро. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1959. 136 с.

Агрокліматичний довідник по Автономній Республіці Крим (1986–2005 рр.) / Ред.: О. І. Прудко, Т. І. Адаменко. Сімферополь: Таврида, 2011. 342 с.

Акимова Д. П. Радиационный и тепловой режимы в дубово-сосновых культурах на высоте 1300 м и в области питания минеральных источников // Научные труды Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства. 1972. Вып. 11. С. 3–11.

Алексеев В. А. Световой режим леса / АН СССР, Ботан. ин-т им. В. Л. Комарова. Ленинград: Наука, Ленингр. отд-ние, 1975. 227 с.

Амеличев Г. Н., Токарев С. В., Токарев И. В. Формирование и режим карстовых подземных вод в бассейне р. Абдалка (Предгорный Крым) // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5, № 2. С. 202–233.

Антюфеев В. В. Радиационный баланс и устойчивость горно-лесных экосистем в рекреационных районах Крыма // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. 1988. Т. 104. С. 140–152. EDNORYVRF.

Арманд Д. Л. Наука о ландшафте (Основы теории и логико-математические методы). Москва: Мысль, 1975. 288 с.

Атлас. Автономна Республіка Крим : карта, картографическое издание = Атлас : Автономная Республика Крым / Под ред.: М. В. Багров, Л. Г. Руденко. Сімферополь: Таврійський національний університет ім. В. І. Вернадського, 2003. 79 с.

Барашкова Е. П. Радиационный баланс Карадага // Актинометрия и атмосферная оптика : труды совещания / Ред. К. С Шифрин. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1961. С. 42–47.

Барышникова О. Н. Информационные свойства ландшафтных геосистем и возможности их исследования // География и природопользование Сибири. 2009. Вып. 11. С. 30–35.

Барышникова О. Н., Крупочкин Е. П., Барышников Г. Я. Изучение разнообразия геосистем на основе статистической обработки космических снимков // География и природопользование Сибири. 2009. Вып. 11. С. 35–42.

Бебия С. М. Ольховые леса Абхазии // Биология растений и садоводство: теория, инновации. 2021. № 3 (160). С. 17–25. https://doi.org/10.36305/2712-7788-2021-3-160-17-25.

Берлянд М. Е. Предсказание и регулирование теплового режима приземного слоя атмосферы. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1956. 235 с.

Берлянд Т. Г. Радиационный и тепловой баланс Европейской территории СССР. Ленинград: изд-во и 2-я типолитогр. Гидрометеоиздата, 1948. 68 с. [Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. Вып. 10 (72)].

Беручашвили Н. Л. Геофизика ландшафта : учебное пособие для ун-тов по спец. «География». Москва: Высшая школа, 1990. 286 с.

Беручашвили Н. Л. Четыре измерения ландшафта. Москва: Мысль, 1986. 180 с.

Биоразнообразие биомов России. Равнинные биомы / Под ред. Г. Н. Огуреевой. М.: ФГБУ «ИГКЭ», 2020. 623 с.

Битюков Н. А. Радиационный режим материнских буковых древостоев Сочинского национального парка // Географические исследования Краснодарского края : сборник научных трудов. Краснодар: Кубан. гос. ун-т, 2012а. Вып. 7. С. 56–68.

Битюков Н. А. Теплообмен и тепловой баланс бурых лесных почв под букняками // Известия Сочинского государственного университета. 2012b. № 3 (21). С. 224–230.

Бобра Т. В. Ландшафтные границы: выявление, анализ, картографирование. Симферополь: ТНУ, 2005. 168 с.

Бобра Т. В. Сборник научных статей и эссе на тему организации геопространства, геоэкотонов и экотонизации (2004–2006 гг.). Симферополь: ТНУ, 2007. 160 с.

Бобра Т. В., Багрова Л. А. Крымское южнобережное субсредиземноморье (восточная часть) // Перспективы создания единой природоохранной сети Крыма. Симферополь: Крымучпедгиз, 2002. С. 158–169.

Бобра Т. В., Лычак А. И. Мониторинг экологического состояния лесов Восточного южнобережья Крыма // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия: География. 2004. Т. 17 (56), № 3. С. 46–56.

Боков В. А., Горбунов Р. В. Климатическая диссимметрия склоновых локальных ландшафтных комплексов Горного Крыма // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия: География. 2011. Т. 24 (63), № 1. С. 3–14.

Боков В. А., Яковлева О. Б. Причинно-следственные отношения в процессах формирования увлажнения ландшафтных комплексов // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. Т. 6 (16), вып. 1. С. 39–56.

Борисов А. А. Радиационный режим Крыма // Материалы по метеорологии и климатологии. 1963. Вып. 1. С. 24–40.

Бочарников М. В., Петрушина М. Н., Суслова Е. Г. Пространственная организация растительности и ландшафтов пояса субсредиземноморских лесов и редколесий полуострова Абрау (Северо-Западный Кавказ) // Аридные экосистемы. 2019. Т. 25, № 4 (81). С. 30–41.

Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1956. 256 с.

Бужинский Е. П. Приоритеты развития беспилотников: от военного дела к экономике // Индекс безопасности. 2014. Т. 20, № 2 (109). С. 109–118.

Ведь И. П. Радиационный баланс и фитоклимат молодых насаждений сосны крымской // Лесоведение. 1974. № 5. С. 3–9.

Ведь И. П. Роль наземных гидрометеоров в водном балансе Крымского нагорья // Метеорология и гидрология. 1967. № 4. С. 68–72.

Ведь И. П. Сезонные особенности радиационного, теплового и водного режимов мелиоративных насаждений сосны крымской // Известия АН СССР. Серия географическая. 1978. № 2. С. 79–84.

Ведь И. П. Тепловой и радиационный баланс леса на Крымском нагорье // Известия АН СССР. Серия географическая. 1971. № 2. С. 61–70.

Ведь И. П., Федосеев А. П. О влиянии молодой культуры сосны на радиационный и тепловой режим приземного слоя воздуха в районе Крымских нагорий // Лесоводство и агролесомелиорация. 1967. Вып. 13. С. 71–78.

Вечерков В. В., Дунаева Е. А., Филина Я. А. Совместное использование ДЗЗ и БВС для оценки внутриполевой неоднородности // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : Материалы X Международной научной конференции, Красноярск, 12–15 сентября 2023 года / Научный редактор Е. А. Ваганов, отв. редактор Г. М. Цибульский. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. С. 22–26. EDN SMSHYT.

Воейков А. И. Климаты земного шара, в особенности России. Санкт-Петербург: Картогр. заведение А. Ильина, 1884. 640 с.

Воздушный кодекс Российской Федерации [19 марта 1997 года № 60-ФЗ, принят Государственной Думой 19 февраля 1997 года, одобрен Советом Федерации 5 марта 1997 года (в ред. Федеральных законов от 08.07.1999 г. № 150-ФЗ, от 02.07.2021 г. № 331-ФЗ, с изм.,

внесенными Постановлением Конституционного Суда РФ от 16.07.2018 г. № 32-П)] : текст с изменениями и дополнениями на 2022 год. [Офиц. изд.]. Москва: Эксмо, 2022. 93 с.

Выгодская Н. Н. Методика фитоактинометрических исследований в горных районах // Фитоактинометрические исследования горных лесов. Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 20–37.

Выгодская Н. Н. Радиационный режим 30-летнего дубняка в суточной и сезонной динамике // Световой режим, фотосинтез и продуктивность леса [материалы совещания. 9–11 февр. 1965 г.] / [Отв. ред. Ю. Л. Цельникер]. Москва: Наука, 1967. С. 77–94.

Гаркуша Л. Я. Внутриладшафтная структура и экологические особенности грабовых лесов Горного Крыма // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия: География. 2008. Т. 21 (60), № 3. С. 102–118.

Гаркуша Л. Я. Карта растительности Горного Крыма // Трансформация ландшафтно-экологических процессов в Крыму в XX веке – начале XXI века / Под ред. В. А. Бокова. Симферополь: Доля, 2010. С. 262–265.

Гаркуша Л. Я., Багрова Л. А. Состав, структура и современное экологическое состояние «дубков» лесостепного пояса Предгорного Крыма // Экосистемы. 2012. № 6 (25). С. 62–75.

Геворкян Ф. С. О комплексных геоморфологических показателях для характеристики эрозионного расчленения // Геоморфология. 1972. № 3. С. 44–48.

Геологическая карта Горного Крыма. Масштаб 1:200000 / Гл. ред. Н. Е. Деренюк; МинГео СССР. [Симферополь]: [б. и.], 1984. 1 лист.

Герасимов Я. И., Древинг В. П., Ерёмин Е. Н., Киселёв А. В., Лебедев В. П., Панченков Г. М., Шлыгин А. И. Курс физической химии / Под общ. ред. Я. И. Герасимова. Москва: Химия, 1969. Т. 1. 592 с.

Геренчук К. І., Раковська Е. М., Топчієв О. Г. Польові географічні дослідження. Київ: Вища школа, 1975. 246 с.

Глухов И. Г. О водном балансе и гидрогеологическом районировании Юго-Западной части Главной гряды Крымских гор // Вестник Московского государственного университета. 1959. Вып. 4. С. 147–160.

Гойса Н. И. Радиационный баланс и эффективное излучение на территории Украины и Молдавии // Труды УкрНИГМИ. 1964. Вып. 41. С. 3–22.

Гойса Н. И. Распределение суммарной радиации по территории Украины и Молдавии // Труды УкрНИГМИ. 1961. Вып. 26. С. 14–28.

Голубев В. Н. К изучению эколого-биологической структуры растительных сообществ (на примере дубово-можжевеловых лесов Южного берега Крыма) // Ботанический журнал. 1989. Т. 74, № 8. С. 1140–1153.

Голубева И. В. К эколого-биологической характеристике высокоможжевеловой и пушистодубовой формаций заповедника «Мыс Мартьян» // Бюллетень Никитского ботанического сада. 1981. Вып. 3 (46). С. 22–27.

Горбунов Р. В. Внутриландшафтные факторы формирования диссимметрии склоновых локальных ландшафтных комплексов Горного Крыма // Людина та довкілля. Проблеми неоекології. 2011a. № 3–4. С. 67–72.

Горбунов Р. В. Собственная диссимметрия склоновых локальных ландшафтных комплексов // Экосистемы, их оптимизация и охрана. 2011b. № 4 (23). С. 157–173.

Горбунов Р. В. Функционирование и динамика региональных геоэкосистем в условиях изменения климата (на примере Крымского полуострова). Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2022. 191 с.

Горбунов Р. В., Горбунова Т. Ю. Проявление снеговой диссимметрии склоновых локальных ландшафтных комплексов в Юго-Восточном Крыму // Биоразнообразие и устойчивое развитие : материалы докладов III Международной научно-практической конференции, Сим-

ферополь, 15–19 сентября 2014 года / Гл. ред. Н. В. Багров. Симферополь: Крымский научный центр, 2014. С. 91–93.

Горбунов Р. В., Горбунова Т. Ю., Кузнецов А. Н., Кузнецова С. П., Лебедев Я. О., Ву М. Особенности формирования элементов радиационного баланса среднегорных тропических лесов Южного Вьетнама // Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского природного заповедника РАН. 2019. Вып. 4 (12). С. 3–16.

Горбунов Р. В., Горбунова Т. Ю., Табунщик В. А., Дрыгваль А. В. Радиационный баланс экосистем дубовых лесов Крымского полуострова // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2020a. Т. 28, № 3. С. 201–212.

Горбунов Р. В., Горбунова Т. Ю., Табунщик В. А., Дрыгваль А. В. Структура и межгодовая динамика радиационного баланса региональных экосистем Равнинного Крыма // Экосистемы. 2020b. № 23 (53). С. 5–15. https://doi.org/10.37279/2414-4738-2020-23-5-15 .

Горбунов Р. В., Зуев А. В., Смирнов В. О. Воднобалансовые исследования на территории Карадагского ландшафтно-экологического стационара // 100 лет Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского : сборник научных трудов / ГБУНОПРК «Карадагский природный заповедник», ФГБУН «Институт морских биологических исследований РАН». Симферополь: Н. Оріанда, 2015. С. 734–747.

Горбунов Р. В., Зуев А. В., Снегур А. В. Задержание осадков растительным покровом на территории Карадагского ландшафтно-экологического стационара // Заповедники Крыма. Теория, практика и перспективы заповедного дела в Черноморском регионе : материалы V Международной научно-практической конференции, Симферополь, 22–23 октября 2009 года. Симферополь, 2009. С. 37–41.

Горбунов Р. В., Табунщик В. А., Горбунова Т. Ю., Сафонова М. С. Первичные сведения о водном балансе субтропических пушистодубовых ландшафтов Юго-Восточного Крыма // Изучение водных и наземных экосистем: история и современность : Тезисы докладов II Международной научно-практической конференции, Севастополь, 5–9 сентября 2022 года. Севастополь: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», 2022. С. 85–86. EDNYCXJPS.

Гусев Е. М. Прогнозирование изменения составляющих водного баланса Степного Крыма и влагообеспеченности его фитоценозов в XXI в. / Е. М. Гусев, О. Н. Насонова // III Международная научная конференция по междисциплинарным исследованиям : сборник статей, Екатеринбург, 15 сентября 2023 года / ООО «Институт цифровой экономики и права». Екатеринбург: Общество с ограниченной ответственностью «Институт цифровой экономики и права», 2023. С. 239–245.

Демина О. Н., Рогаль Л. Л., Дмитриев П. А. Сосна пицундская (pinuspityusastev.) В заповеднике «Утриш»: ценотическое разнообразие и анализ популяционной структуры // Охрана биоты в государственном природном заповеднике «Утриш» : научные труды / Государственный природный заповедник «Утриш». Майкоп: ООО «Полиграф-ЮГ», 2015. С. 142–156.

Дидух Я. П. Растительность // Атлас. Автономна Республіка Крим : карта, картографическое издание = Атлас : Автономная Республика Крым / [Ред. М. В. Багров, Л. Г. Руденко]. Сімферополь: Таврійський національний університет ім. В. І. Вернадського, 2003. С. 30.

Дидух Я. П. Растительный покров Горного Крыма (структура, динамика, эволюция и охрана). Киев: Наукова думка, 1992. 256 с.

Драган Н. А. Почвы Крыма // Атлас. Автономна Республіка Крим : карта, картографическое издание = Атлас : Автономная Республика Крым / [Ред. М. В. Багров, Л. Г. Руденко]. Сімферополь: Таврійський національний університет ім. В. І. Вернадського, 2003. С. 30.

Дубинина М. Г. Технико-экономический анализ военных БПЛА Израиля // Концепции. 2017. № 1 (36). С. 21–29.

Дублянский В. Н. О роли испарения и водном балансе Горного Крыма // Труды УкрНИГМИ. 1966. Вып. 62. С. 49–55.

Дунаева Е. А., Попович В. Ф., Ляшевский В. И. Анализ динамики количественных и качественных характеристик водных ресурсов с использованием открытых ГИС и агрогидрологических моделей // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2015. № 1 (17). С. 127–141.

Ена А. В. Природная флора Крымского полуострова. Симферополь: Н. Оріанда, 2012. 232 с.

Ена В. Г., Ена Ал. В., Ена Ан. В. Заповедные ландшафты Тавриды. Симферополь: Бизнес-Информ, 2004. 424 с.

Ергина Е. И., Горбунов Р. В., Тронза Г. Е., Лебедев Я. О., Хижняк Ю. С. Изучение и идентификация почвенных эталонов и редких почв с целью мониторинга и охраны почвенных ресурсов в Равнинном Крыму. Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал»», 2017. 136 с.

Ермаков Н. Б., Плугатарь Ю. В., Лейба В. Д., Ермакова Е. В. Растительные сообщества широколиственных лесов Колхидской низменности (Западное Закавказье) // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. 2021. № 138. С. 39–49. https://doi.org/10.36305/0513-1634-2021-138-39-49 .

Зуев А. В., Летухова В. Ю., Зуева Е. А. Климатические изменения как фактор трансформации растительного покрова на примере Карадагского ландшафтно-экологического стационара // Труды Карадагской научной станции имени Т. И. Вяземского природного заповедника РАН. 2020. № 1 (13). С. 77–98.

Зукерт Н. В., Выгодская Н. Н., Лебедева М. Г., Шерман Е. В. Радиационный режим под пологом горных лесов // Фитоактинометрические исследования горных лесов. Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1967. С. 162–178.

Иваненко Ф. К. Лесные экосистемы заповедника «Утриш», их исследование и охрана // Наземные и морские экосистемы Причерноморья и их охрана : сборник тезисов научно-практической школы-конференции, Новороссийск, 23–27 апреля 2018 года. Новороссийск: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт природно-технических систем», 2018. С. 51–53.

Иваненко Ф. К. Мониторинг лесных фитоценозов заповедника «Утриш» в 2011–2016 гг. // Наземные и морские экосистемы полуострова Абрау: история, состояние, охрана : научные труды. Анапа: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный природный заповедник «Утриш»», 2021. Т. 5. С. 79–85.

Иванова Н. В., Шашков М. П., Шанин В. Н. Исследование структуры древостоев сосновых лесов Приокско-Террасного биосферного заповедника (Россия) по материалам аэрофотосъемки с квадрокоптера // NatureConservationResearch. Заповедная наука. 2021. Т. 6, № 4. С. 1–14. https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2021.042 .

Иванова Н. В., Шашков М. П., Шанин В. Н. Определение характеристик смешанных древостоев по данным аэрофотосъёмки с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2021. № 54. С. 158–175. https://doi.org/10.17223/19988591/54/8 .

Ипполитов И. И., Кабанов М. В., Логинов С. В., Соколов К. И., Харюткина Е. В. Изменчивость составляющих теплового баланса поверхности Азиатской территории России в период современного глобального потепления // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 22–29.

Исаков А. Л., Лаврова А. Ю. Солнечная радиация и температурный режим земляного полотна // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 3. С. 15–19.

Исаченко А. Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. 365 с.

Кабонен А. В., Ольхин Ю. В. Цифровое моделирование природно-ландшафтных комплексов по данным, полученным с помощью беспилотных летательных аппаратов // Лесохозяйственная информация. 2020. № 3. С. 101–110.

Каляев А. И., Коровин Я. С. Комплекс обнаружения и поражения БПЛА-нарушителей с помощью БПЛА-перехватчиков // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 3–4 (153–154). С. 101–107.

Карадаг заповедный : научно-популярные очерки / Под ред. А. Л. Морозовой. Симферополь: Н. Оріанда, 2011. 288 с.

Каюкова Е. П. Использование гидрохимических данных для оценки элементов водного баланса (на примере бассейна р. Бодрак, Юго-Западный Крым) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2016. № 4. С. 25–36. https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2016.403.

Климат и опасные гидрометеорологические явления Крыма / Под ред. К. Т. Логвинова, М. Б. Барабаш. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1982. 318 с.

Климатический атлас Крыма. Симферополь: «Таврия-Плюс», 2000. 118 с.

Клюкин А. А., Корженевский В. В., Щепинский А. А. Эчки-Даг : путеводитель. Симферополь: Таврия, 1990. 128 с.

Клюкин, А. А. Экзогеодинамика Крыма. Симферополь: Таврия, 2007. 320 с.

Ключкина А. А., Прокопов Г. А. Современная ландшафтная структура ландшафтно-рекреационного парка «Лисья бухта Эчкидаг» (Юго-Восточный Крым) // Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского природного заповедника РАН. 2019. № 1 (9). С. 74–85. https://doi.org/10.21072/eco.2021.09.03 .

Коба В. П. Оценка динамики водного баланса хвойных лесов Горного Крыма // Заповедники Крыма на рубеже тысячелетий : материалы Республиканской конференции, Симферополь, 27 апреля 2001 года. Симферополь: Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского, 2001. С. 52–54.

Коба В. П. Экономическая оценка последствий пожаров в лесах Южного берега Крыма // Научные труды Крымского государственного аграрного университета. 2000. № 63. С. 201–205.

Кобечинская В. Г., Онищенко Т. С. Послепожарные сукцессии сосновых лесов Крыма // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2017. Т. 3 (69), № 4. С. 112–126. EDN YLMDZB.

Конвенция о биологическом разнообразии [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/biodiv.shtml (accessed on 8 August 2023).

Кондратьев К. Я., Розенберг Г. В. Совещание по актинометрии и атмосферной оптике // Успехи физических наук. 1959. Т. 68, вып. 2. С. 345–358. https://doi.org/10.3367/UFNr.0068.195906f.0345 .

Корженевский В. В. Клейкоольховые леса Южного берега Крыма // Флористические критерии при классификации растительности : тезисы докладов VI Всесоюзного совещания по классификации растительности, Уфа, сентябрь 1981 г. Уфа: Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, 1981. С. 142–143.

Корженевский В. В. Скальнодубовые леса южного макросклона Главной гряды Крымских гор // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. 1982. Т. 86. С. 36–45.

Корженевский В. В., Багрикова Н. А. Растительные сообщества // Биоразнообразие Крыма: оценка и потребности сохранения : материалы, Гурзуф, 10–15 ноября 1997 года / Программа поддержки биоразнообразия (TheBiodiversitySupportProgramBSP). Гурзуф: BiodiversitySupportProgram, 1997. С. 26–31.

Корженевский В. В., Клюкин А. А. Растительность бедлендов Крыма // Экология. 1989. № 6. С. 26–33.

Корженевский В. В., Плугатарь Ю. В. Леса из Pinussylvestrisvar. hamataSteven на градиентах факторов среды в Горном Крыму // Международный научный институт «Educatio». 2016. № 5 (23). С. 7–11.

Корженевский В. В., Шеляг-Сосонко Ю. Р. Синтаксономія пухнастодубових лісів південного макросхилу Кримських гір (Синтаксономия пушистодубовых лесов южного макросклона Крымских гор) // Украинский ботанический журнал. 1983. Т. 40, № 1. С. 10–16.

Корсакова С. П. Агроклиматические ресурсы участка № 32 Никитского ботанического сада // Научные записки природного заповедника «Мыс Мартьян». 2015. № 6. С. 6–19.

Косолапов В. В. Крымско-Кавказская провинция ксерофитных лесов как уникальная область полусухих субтропиков // Курорты. Сервис. Туризм. 2016. № 2 (31). С. 47–50.

Котлов И. П., Горбунов Р. В., Фам МаиФыонг, Дин Ву Ан Ту. Беспилотная аэрофотосъемка для задач крупномасштабного картографирования горных тропических лесных ландшафтов // Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского природного заповедника РАН. 2018. № 2 (6). С. 63–84. https://doi.org/10.21072/eco.2021.06.04 .

Кочкин М. А. Почвы, леса и климат Горного Крыма и пути их рационального использования. Москва: Колос, 1967. 368 с.

Кочуров Б. И., Карандеев А. Ю., Мерекалова К. А., Харитонова Т. И., Беляева Л. Н., Климов Д. С. Выделение древесной растительности с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для оценки зеленой инфраструктуры городских ландшафтов // Проблемы региональной экологии. 2021. № 5. С. 42–47.

Крупочкин Е. П., Папин Д. В., Фролов Я. В., Редников А. А., Шульга П. И. О результатах мультиспектральной БПЛА-съемки археологических объектов могильника «Урочище Балчикова-3» с использованием камеры ParrotSequoia // Теория и практика археологических исследований. 2019. № 4 (28). С. 109–121.

Кузнецов И. В., Боков В. А., Устюгов Д. Л., Павлюк Н. Я. Методология оценки водно-ресурсного потенциала Крыма и приоритетные задачи его изучения // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2021. Т. 7, № 4. С. 155–171. EDNSFWHMG.

Кузнецов М. Е. Возрастная структура ценопопуляций Tiliadasystyla в лесах Юго-Восточного Крыма // Устойчивое развитие особо охраняемых природных территорий : сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции, Сочи, 2–4 декабря 2015 года. Сочи: Государственное бюджетное учреждение Краснодарского края «Природный орнитологический парк в Имеретинской низменности», 2015. С. 135–140.

Ландшафтно-геофизические условия произрастания лесов юго-восточной части Горного Крыма / Под ред. В. А. Бокова. Симферополь: Таврия-Плюс, 2001. 133 с.

Ландшафтно-экологический стационар Карадагского природного заповедника / Под ред. А. Л. Морозовой, Ю. И. Будашкина, В. А. Бокова. Симферополь: Таврия-Плюс, 1999. 110 с.

Леса СССР: Т. 3: Леса юга Европейской части СССР и Закавказья. Москва: Наука, 1966. 463 с.

Летухова В. Ю. Потапенко И. Л., Кузнецов М. Е. Популяция фисташки туполистной (Pistaciamutica Fisot. C. A. Mey.) в долине Беш-Таш (Юго-Восточный Крым) // NatureConservationResearch. Заповедная наука. 2016. Т. 1, № 2. С. 11–18.

Мазулин Г. А. Использование беспилотных летательных аппаратов Министерства обороны Вооружённых сил РФ в Сирии // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования. 2017. № 2 (11). С. 45–50.

Макарычев С. В., Мазиров М. А. Теплофизические основы мелиорации почв. Москва: [б. и.], 2004. 289 с.

Мамай И. И. Динамика ландшафтов. Методика изучения. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. 167 с.

Манышев К. С., Слободин Я. А., Филиппов П. Б., Лялина Е. В. Оценка экологического состояния буковых лесов Белогорского района Республики Крым // Малые вавиловские чте-

ния : Сборник материалов Международной научно-практической конференции молодых ученых по итогам научно-исследовательской экспедиции «Дорогами Н. И. Вавилова» в Крым, Саратов, 26–28 ноября 2018 года. Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова, 2018. С. 177–181.

Миллер Г. П. Ландшафтные исследования горных и предгорных территорий. Львов: Вища школа, 1974. 202 с.

Миронова Л. П. Опасность снижения биоразнообразия при интенсивном освоении природных ресурсов на примере Юго-Восточного Крыма // Природа и общество: Социоприродное взаимодействие во всемирно-историческом процессе, Судак, 14–18 сентября 2020 года. Москва: ООО «МАКС Пресс», 2020. С. 82–91. DOI 10.29003/ml949.s-n_history_2020_43/82-91. EDNPDCCJF.

Миронова Л. П. Оценка фиторазнообразия природных комплексов Юго-Восточного Крыма // Биоразнообразие: подходы к изучению и сохранению : материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию кафедры ботаники Тверского государственного университета, Тверь, 8–11 ноября 2017 года. Тверь: Тверской государственный университет, 2017. С. 246–249. EDNYLMLUP.

Миронова Л. П. Редкие сосудистые растения во флорах природных комплексов Юго-Восточного Крыма: состояние, степень изученности, проблемы охраны // Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского Природного заповедника РАН. 2019. № 1 (9). С. 3–60. DOI 10.21072/eco.2021.09.01. EDNFVXCMD.

Миронова Л. П., Фатерыга В. В. Флора Карадагского природного заповедника (сосудистые растения) // 100 лет Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского : сборник научных трудов / ГБУНОПРК «Карадагский природный заповедник», ФГБУН «Институт морских биологических исследований РАН». Симферополь: Нова Оріанда, 2015. С. 160–204. EDNXEVCXB.

Миронова Л. П., Знаменская Л. В. Влияние дикого кабана (Susscrofa) на почвенно-растительный покров в Государственном природном заповеднике «Карадагский» / Ред. Р. В. Горбунов, Ан. В. Ена. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2023. 214 с.

Миронова Л. П., Шатко В. Г. Конспект флоры хребта Узунсырт и Баракольской котловины в Восточном Крыму // Бюллетень Главного ботанического сада. 2010. № 196. С. 74–101. EDNTOETET.

Миронова Л. П., Шатко В. Г. Полуостров Меганом в Юго-Восточном Крыму (природные условия, флора, растительность) // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2013. Т. 9, № 2–2. С. 26–64. EDNVMBFUF.

Михайлов В. Н. Добровольский А. Д., Добролюбов С. А. Гидрология. М.: Высшая школа. 2007. 463 с.

Михайлов В. А. Комплексный морфометрический анализ Тарханкутского полуострова с помощью ГИС // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 2–4 (46). С. 5–13.

Муратов М. В. Краткий очерк геологического строения Крымского полуострова. М.: Госгеолтехиздат, 1960. 207 с.

Научно-прикладные основы создания природного национального парка «Таврида» и большой эколого-этнографической тропы в Крыму : Прил. к науч.-практ. дискус.-аналит. сб. «Вопросы развития Крыма» / Ком. по науке и регион. развитию при Совете Министров Автоном. Респ. Крым, Крым. акад. наук; В. Г. Ена [и др.]. Симферополь: Сонат, 2000. 103 с.

Нго Ч. З., Нгуен Д. Х., Данг Х. К., Колесников С. И., Минникова Т. В. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для картографирования ландшафта тропической растительности в заповеднике Нгок Линь, Кон Тум, Вьетнам // АгроЭкоИнфо. 2020. № 4 (42). С. 1–7.

Николаев В. А. Космическое ландшафтоведение. М.: Изд-во Моск. университета, 1993. 81 с.

Огнева Т. А. Роль радиационного баланса в суммарном испарении // Тепловой баланс. Труды Главной Геофизической обсерватории им. В. И. Воейкова. 1967. Вып. 193. С. 130–136.

Олиферов А. Н. О селевых паводках в Крыму // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2005. Вып. 2. С. 67–72.

Остроухов А. В., Климина Е. М., Купцова В. А. Ландшафтное картографирование труднодоступных территорий на примере государственного природного заповедника «Болоньский» (Россия) // NatureConservationResearch. Заповедная наука. 2020. Т. 5, № 2. С. 47–63.

Павлов А. В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Изд. «Наука» Сибирское отделение, 1979. 284 с.

Папельбу В. В. Плотность упаковки видов сообществ чернососнового леса в Горном Крыму на разных стадиях рекреационной дигрессии // Интеграция современных научных исследований в развитие общества : сборник материалов V Международной научно-практической конференции, Кемерово, 7 мая 2018 года. Том 2. Кемерово: Общество с ограниченной ответственностью «Западно-Сибирский научный центр», 2018. С. 45–47.

Петлін В. М. Стратегія ландшафту. Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2007. 288 с.

Петрушина М. Н. Биогеохимические особенности ландшафтов заповедника «Утриш» // Наземные и морские экосистемы полуострова Абрау: история, состояние, охрана : Научные труды. Анапа: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный природный заповедник «Утриш»», 2021. С. 48–57.

Петрушина М. Н., Пичугина Е. М., Ермолов И. Л. Особенности ландшафтов водопадной щели заповедника «Утриш» // Наземные и морские экосистемы полуострова Абрау: история, состояние, охрана : Научные труды. Анапа: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный природный заповедник «Утриш»», 2021. С. 38–47.

Плугатарь Ю. В., Астапов А. Ю. Мониторинг лесов Крыма // Моніторинг навколишнього середовища: науково-методичне, нормативне, технічне, програмне забезпечення : Матеріали другої науково-практичної конференції, Коктебель, 24–28 сентября 2007 года. Коктебель: НПЦ «Екологія наука техніка», 2007. С. 52–54. EDNZSNLRF.

Плугатарь Ю. В., Коба В. П., Сахно Т. М., Хромов А. Ф. Типологическая структура и продуктивность сосновых лесов Горного Крыма // Биология растений и садоводство: теория, инновации. 2019. № 3 (152). С. 26–35.

Плугатарь Ю. В., Корженевский В. В. Типология и экология лесов Крыма // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. 2016. Т. 143. С. 164–172. EDNXCDKEH.

Плугатарь Ю. В., Корженевский В. В., Абраменков А. А. Шибляк или маквис? О внедрении Quercusilex L. в фитоценозы южнобережного Крыма // Биология растений и садоводство: теория, инновации. 2022. № 3 (164). С. 6–19. DOI 10.36305/2712-7788-2022-3-164-6-19. EDNWITGTL.

Плугатарь Ю. В. Леса Крыма. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2015. 385 с.

Плугатарь Ю. В., Ковалев М. С., Плугатарь С. А. Дубовые леса Горного Крыма: распространение, типологическая структура, продуктивность // Наукові праці Лісівничої академії наук України. 2013. № 11. С. 88–92. EDNSMKXUB.

Плугатарь, Ю. В., Коба В. П. Значение лесных ресурсов в формировании водного баланса Крыма // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : Материалы II Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2017 года / Под редакцией В. М. Гедьо. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова, 2017. С. 121–122. EDNZIMBNP.

Поверхностные водные объекты Крыма. Управление и использование водных ресурсов : справочник / Под ред. А. А. Лисовского. Симферополь: КРП «Издательство «Крымучпедгис»», 2011. 242 с.

Покоева М. В., Ярославцев А. М. Экологические исследования смешанных насаждений методами дистанционного зондирования // Лесной вестник. ForestryBulletin. 2020. Т. 24. № 3. С. 33–38.

Постарнак Ю. А. Редкий генофонд светлохвойных лесов из сосны пицундской в прибрежной зоне Черного моря России // Экологические проблемы рекреационного использования горных лесов : Материалы I Всероссийской научно-практической конференции, Краснодар, 14 ноября 2020 года. Краснодар: Кубанский государственный университет, 2020. С. 160–165.

Почвенная карта УССР. 1966. 10 листов.

Природа Карадага / Под ред. А. Л. Морозовой, А. А. Вронского. Киев: Наукова думка, 1989. 286 с.

Прохорова У. В., Терехов А. В., Иванов Б. В., Веркулич С. Р. Расчет составляющих теплового баланса ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) в период абляции по данным наблюдений 2019 года // Криосфера Земли. 2021. Т. 25, № 3. С. 50–60.

Пшеничников Н. А. Особенности типологической структуры средиземноморских лесных формаций в Горном Крыму // Природные ресурсы : состояние и рациональное использование : материалы Международной научно-практической конференции, Орёл, 15–16 декабря 2021 года. Орёл: Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева, 2022. С. 354–365. EDNHXSGDY.

Разработка экологически сбалансированных способов защиты и восстановления водных объектов на территории Крыма / Под ред. д. геогр. н., проф. Бокова В. А. Симферополь: ТНУ, 2013. 211 с.

Рахманов В. В. Гидроклиматическая роль лесов. Москва: Лесная промышленность, 1984. 240 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 6: Украина и Молдавия. Вып. 4. Крым Ленинград: Гидрометеоиздат, 1966. 344 с.

Роговой В. И. Особенности воспроизводства буковых лесов Крыма // Биологическое разнообразие и устойчивость лесных и урбоэкосистем. Первые международные чтения памяти Г. Ф. Морозова: Материалы научно-практической конференции, Ялта, 12–15 сентября 2019 года. Ялта: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал»», 2019. С. 98–100.

Рубцов Н. И., Махаев Л. В., Шалыт М. С., Котова И. Н. Растительный мир. Симферополь: Крым, 1966. 118 с.

Сангулия Т. Б. Буковые леса Абхазии // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2013. № 4. С. 45–50. EDNRIWOGR.

Сангулия Т. Б., Сиволапов А. И. Ценный генофонд бука восточного (fagusorientalislipsky) в Рицинском реликтовом национальном парке (Республика Абхазия) // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. С. 365. EDNROFXNR.

Сивков С. И. Некоторые выводы из актинометрических наблюдений в Феодосии и Карадаге // Метеорололология и гидрология. 1940. № 10. С. 3–13.

Синицын Е. М. Смена поколений девственных буковых древостоев Крымского природного заповедника. Воронеж: ВГПУ, 2010. 123 с. ISBN 978-5-88519-613-0. EDNQKTBVH.

Скуднева О. В., Коптев С. В., Иванцов С. В. Навигационно-пилотажная система беспилотного летательного аппарата для мониторинга лесных пожаров // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 6 (378). С. 194–203.

Смирнов В. О. Анализ геофизических параметров заповедника «Мыс Мартьян»: расчеты прямой, рассеянной и суммарной радиации // Научные записки природного заповедника «Мыс Мартьян». 2016. № 7. С. 56–61. EDNXCBZOT.

Смирнов В. О. Водный режим почв заповедника «Мыс Мартьян» и его связь с геотопологическими параметрами территории // Ученые записки Таврического национального

университета имени В. И. Вернадского. Серия: География. 2009. Т. 22 (61), № 2. С. 121–138. EDNUNXIFZ.

Смирнов В. О. Роль местоположений в дифференциации тепла и влаги в Горном Крыму: автореферат дисс. на соискание уч. степени канд. геогр. наук: спец. 11.00.01 «Физическая география, геофизика и геохимия ландшафтов» / В. О. Смирнов. Симферополь, 2009. 22 с.

Смирнов В. О. Влияние условий затенения на перераспределение прямой солнечной радиации (на примере территории заповедника «Мыс Марьян») // Культура народов Причерноморья. 2009. № 164. С. 168–171.

Смирнов В. О. Некоторые аспекты фитоактинометрических исследований в лесах заповедника «Мыс Мартьян» // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2012. Т. 8. № 1–2. С. 104–109.

Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий / Е. А. Позаченюк, В. М. Шумский, А. М. Лесов [и др.] ; Республиканский комитет Автономной Республики Крым по охране окружающей природной среды Таврический национальный университет имени В. И. Вернадского. Симферополь: Бизнес-Информ, 2009. 672 с.

Солнцев В. Н. Системная организация ландшафтов. М.: Наука, 1981. 239 с.

Соцкова Л. М., Смирнов В. О. Подходы к информационно-картографической интерпретации трансформации водного баланса Крыма // Ученые записки Таврического национального университета имени В. И. Вернадского. Серия: География. 2011. Т. 24 (63), № 2–2. С. 51–58. EDNUNXJDV.

Сочава В. Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 320 с.

Способ определения удельной теплоемкости почв. Патент РФ, № 4914260. М., 1993. 4 с.

Сурова Н. А. Продуктивность и тепловой баланс бореальных лесов южнокурильских островов // Самарская лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2018. Т. 27, № 2. С. 147–160.

Сухачева Е. Ю., Ревина Я. С. Цифровая почвенная карта Южного берега Крыма // Почвоведение. 2020. № 4. С. 389–397.

Тимченко З. В. Гидрография и гидрология рек Крыма. Симферополь: АРИАЛ, 2012. 290 с.

Тищенко А. П. Экспериментальные исследования по изучению водного баланса риса в Крыму // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2017. № 2 (66). С. 45–50. EDNYZKJXX.

Токарев С. В., Амеличев Г. В., Токарев И. В. Гидрохимические и гидродинамические особенности карстовых подземных вод юго-восточной части г. Симферополя в условиях антропогенно-нарушенного режима // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5, № S4. С. 199–218. EDNQBJUQE.

Трансформация водного баланса в Крыму в XX веке начале XXI века / Под ред. В. А. Бокова. Симферополь: Крымский научный центр, 2011. 227 с.

Трансформация ландшафтно-экологических процессов в Крыму в XX веке – начале XXI века / В. А. Боков [и др.]. Симферополь: ДОЛЯ, 2010. 304 с. ISBN 978-966-366-320-3. EDNWYSLEF.

Угаров И. С. Радиационный баланс леса Центральной Якутии // Научный альманах: Науки о Земле. 2018. № 9–2 (47). С. 128.

Фатерыга В. В. Эколого-биологическая структура флоры высокоможжевеловых лесов Южного берега Крыма в условиях рекреационного воздействия // Экосистемы, их оптимизация и охрана. 2010. № 3 (22). С. 21–26. EDNVKBKOX.

Физические свойства воздуха: плотность, вязкость, удельная теплоемкость [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://thermalinfo.ru/svojstva-gazov/gazovye-smesi/fizicheskie-svojstva-vozduha-plotnost-vyazkost-teploemkost-entropiya (accessed on 8 August 2023).

Фурса Д. И., Корсакова С. П., Амирджанов А. Г., Фурса В. П. Радиационный и гидротермический режим Южного берега Крыма по данным агрометеостанции «Никитский сад» за 1930–2004 гг. и его учет в практике виноградарства. Ялта: НБС, 2006. 55 с.

Чернодубов А. И., Руденок Я. Г. Биоразнообразие фитоценозов заповедника «Утриш» // Лесотехнический журнал. 2015. Т. 5, № 1 (17). С. 120–127. DOI 10.12737/11269. EDNTVXUDD.

Чильчигешева И. В. Геоинформационная система по ландшафтам Командорских островов для научных и образовательных целей // Открытое и дистанционное образование. 2020. № 1 (77). С. 25–30.

Чумакова М. С. О ночном ходе эффективного излучения на Карадаге // Труды ГГО. 1947. Вып. 5. С. 25–31.

Шатко В. Г., Миронова Л. П. Конспект флоры хребта Тепе-Оба (Крым) // Бюллетень Главного ботанического сада. 2011. № 197. С. 43–70. EDNTMFBJD.

Шеляг-Сосонко Ю. Р., Дідух Я. П. Рідколісся ялівцювисокого (Juniperetaexcelsae) Криму та аналіз їх флори // Український ботанічний журнал. 1975. Т. 32, № 6. С. 753–762.

Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Издательство иностранной литературы, 1963. 829 с.

Юдин В. В. Геологическая карта и разрезы Горного, Предгорного Крыма. Масштаб 1:200000. Санкт-Петербург: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2018. 2 листа.

Abdullah A. Y. M., Masrur A., Adnan M. S. G., Baky M. A. A., Hassan Q K., Dewan A. Spatio-Temporal Patterns of Land Use / Land Cover Change in the Heterogeneous Coastal Region of Bangladesh between 1990 and 2017 // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Article number: 790. https://doi.org/10.3390/rs11070790.

Adkins C. J. Balance Thermodynamics. [Electronic resource]. Available online: https://archive.org/details/equilibriumtherm0000adki (accessed on 8 August 2023).

Aguillaume L., Izquieta-Rojano S., García-Gómez H., Elustondo D., Santamaría J., Alonso R., Avila A. Dry deposition and canopy uptake in Mediterranean holm-oak forests estimated with a canopy budget model: A focus on N estimations // Atmospheric Environment. 2017. Vol. 152. pp. 191–200. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.12.038.

Ander T. Earth's Balanced Climates in View of Their Energy Budgets. Available online: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-568771/v1 (accessed on 8 August 2023), https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-568771/v1

Bacciu V., Hatzaki M., Karali A., Cauchy A., Giannakopoulos C., Spano D., Briche E. Investigating the Climate-Related Risk of Forest Fires for Mediterranean Islands' Blue Economy // Sustainability. 2021. Vol. 13. Article number: 10004. https://doi.org/10.3390/su131810004.

Baldocchi D. D., Ma S., Rambal S., Misson L., Ourcival J-M., Limousin J-M., Papale J., Dario P. On the differential advantages of evergreenness and deciduousness in Mediterranean oak woodlands: a flux perspective // Ecological Applications. 2010. Vol. 20. No. 6. pp. 1583–1597. https://doi.org/10.1890/08-2047.

Banerjee A., Chen R., E. Meadows M., Singh R. B., Mal S., Sengupta D. An Analysis of Long-Term Rainfall Trends and Variability in the Uttarakhand Himalaya Using Google Earth Engine // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. Article number: 709. https://doi.org/10.3390/rs12040709.

Barbour M., Keeler-Wolf T., Schoenherr A. A. Terrestrial vegetation of California. California: University of California Press, 2007. pp. 730. [Electronic resource]. Available online: http://books.google.com/books?id=YNAWPSMm2CUC (accessed on 8 August 2023).

Baret F., Guyot G., Major D. TSAVI: A Vegetation Index Which Minimizes Soil Brightness Effects On LAI And APAR Estimation // Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 1989. Vol. 3. pp. 1355–1358. https://doi.org/10.1109/igarss.1989.576128.

Baudena M., Santana V. M., Baeza M. J., Bautista S., Eppinga M. B., Hemerik L., Mayor A. G., Rodriguez F., Valdecantos A., Vallejo V. R. et al. Increased aridity drives post-fire recovery of Mediterranean forests towards open shrublands // New Phytologist. 2019. Vol. 225. pp. 1500–1515. https://doi.org/10.1111/nph.16252.

Beard J. S., Beeston G. R., Harvey J. M., Hopkins A. J. M., Shepherd D. P. The vegetation of Western Australia at the 1:3.000.000 scale. Explanatory memoir Second edition // Conservation Science Western Australia. 2013. Vol. 9 (1). pp. 1–152.

Belay A. S., Fenta A. A., Yenehun A., Nigate F., Tilahun S. A., Moges M. M., Dessie M., Adgo E., Nyssen J., Chen M., Griensven A. V., Walraevens K. Evaluation and Application of Multi-Source Satellite Rainfall Product CHIRPS to Assess Spatio-Temporal Rainfall Variability on Data-Sparse Western Margins of Ethiopian Highlands // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Article number: 2688. https://doi.org/10.3390/rs11222688.

Bellot J., Escarre A. Stemflow and throughfall determination in a resprouted Mediterranean holm-oak forest // Annales des sciences forestières. EDP Sciences, 1998. Vol. 55. No. 7. pp. 847–865. https://doi.org/10.1051/forest:19980708.

Bentekhici N., Bellal S.-A., Zegrar A. Contribution of remote sensing and GIS to mapping the fire risk of Mediterranean forest: case of the forest massif of Tlemcen (North-West Algeria) // Natural Hazards. 2020. Vol. 104. Pp. 811–831. https://doi.org/10.1007/s11069-020-04191-6.

Bhattacharya B. K., Mallick K., Desai D., Bhat G. S., Morrison R., Cleverly J. R., Woodgate W., Beringer J., Cawse-Nicholson K., Ma S., Verfaillie J., Baldocchi D. A coupled ground heat flux–surface energy balance model of evaporation using thermal remote sensing observations // Biogeosciences. 2022. Vol. 19. pp. 5521–5551. https://doi.org/10.5194/bg-19-5521-2022.

Blondel J. The 'Design' of Mediterranean Landscapes: A Millennial Story of Humans and Ecological Systems during the Historic Period // Human Ecology. 2006. Vol. 34. pp. 713–729. https://doi.org/10.1007/s10745-006-9030-4.

Blondel J., Aronson J. Biodiversity and Ecosystem Function in the Mediterranean Basin: Human and Non-Human Determinants // Ecological Studies. 1995. Vol. 109. pp. 43–120. https://doi.org/10.1007/978-3-642-78881-9_2

Bocharnikov M. V., Petrushina M. N., Suslova E. G. Spatial Organization of the Vegetation and Landscapes of the Sub-Mediterranean Forest and Woodland Belt on the Abrau Peninsula (Northwestern Caucasus) // Arid Ecosystems. 2019. Vol. 9. No. 4. pp. 237–247. https://doi.org/10.1134/s2079096119040024.

Böhler J. E., Schaepman M. E., Kneubühler M. Crop Classification in a Heterogeneous Arable Landscape Using Uncalibrated UAV Data // Remote Sensing. 2018. Vol. 10. Article number: 1282. https://doi.org/10.3390/rs10081282.

Brancalion P. H., Garcia L. C., Loyola R., Rodrigues R. R., Pillar V. D., Lewinsohn T. M. A critical analysis of the Native Vegetation Protection Law of Brazil (2012): updates and ongoing initiatives // NaturezaConservação. 2016. Vol. 14. pp. 1–15. https://doi.org/10.1016/j.ncon.2016.03.003.

Brunt D. Notes on radiation in the atmosphere, I. // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 1932. Vol. 58. pp. 389–418. https://doi.org/10.1002/qj.49705824704.

Cervera T., Pino J., Marull J., Padró R., Tello E. Understanding the long-term dynamics of forest transition: From deforestation to afforestation in a Mediterranean landscape (Catalonia, 1868–2005) // Land Use Policy. 2019. Vol. 80. pp. 318–331. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.10.006.

Chergui B., Fahd S., Santos X. Quercus suber forest and Pinus plantations show different post-fire resilience in Mediterranean north-western Africa // Annals of Forest Science. 2018. Vol. 75. Article number: 64. https://doi.org/10.1007/s13595-018-0742-6.

Chouvardas D., Karatassiou M., Stergiou A., Chrysanthopoulou G. Identifying the Spatiotemporal Transitions and Future Development of a Grazed Mediterranean Landscape of South Greece // Land. 2022. Vol. 11. Article number: 2141. https://doi.org/10.3390/land11122141.

Christen A., Novak M. D., Black A. T., Brown M. The budget of turbulent kinetic energy within and above a sparse Lodgepole Pine stand. [Electronic resource]. Available online: https://www.researchgate.net/publication/51995947_The_budget_of_turbulent_kinetic_energy_within_and_above_a_sparse_Lodgepole_Pine_stand (accessed on 8 August 2023).

Clark John O. E. The Essential Dictionary of Science. [Electronic resource]. Available online: https://archive.org/details/essentialdiction0000unse (accessed on 8 August 2023).

Coreau A., Martin J.-L. Multi-scale study of bird species distribution and of their response to vegetation change: a Mediterranean example // Landscape Ecology. 2007. Vol. 22. pp. 747–764. https://doi.org/10.1007/s10980-006-9074-2.

Coşkun M., Coşkun S. An Analysis on the Distribution of Maquis-Shrubland: Karabuk-Safranbolu Basin (Turkey) // International Journal of Science. 2017. Vol. 3. pp. 63–70. https://doi.org/10.18483/ijSci.1336.

Costa A., Madeira M., Santos J. L., Oliveira Â. Change and dynamics in Mediterranean evergreen oak woodlands landscapes of Southwestern Iberian Peninsula // Landscape and Urban Planning. 2011. Vol. 102. Issue 3. pp. 164–176. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.04.002.

Crevecoeur F., Bollens B., Detrembleur C., Lejeune T. Towards a "gold-standard" approach to address the presence of long-range auto-correlation in physiological time series // Journal of Neuroscience Methods. 2010. Vol. 192. pp. 163–172. https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2010.07.017.

Crippen R. E. Calculating the vegetation index faster // Remote Sensing of Environment. 1990. Vol. 34. Pp. 71–73. https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90085-z.

Cristóbal J., Poyatos R., Ninyerola M., Llorens P., Pons X. Combining remote sensing and GIS climate modelling to estimate daily forest evapotranspiration in a Mediterranean mountain area // Hydrology and Earth System Sciences. 2011. Vol. 15 (5). pp. 1563–1575. https://doi.org/10.5194/hess-15-1563-2011.

Damesin C., Rambal S. Field study of leaf photosynthetic performance by a Mediterranean deciduous oak tree (Quercus pubescens) during a severe summer drought // New Phytologist. 1995. Vol. 131 (2). pp. 159–167. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1995.tb05717.x.

De Dios R. S., Velázquez J., Ollero H. S. Classification and mapping of Spanish Mediterranean mixed forests // Forest – Biogeosciences and Forestry. 2019. Vol. 12. pp. 480–487. https://doi.org/10.3832/ifor2817-012.

Delgado-Artés, Garófano-Gómez V., Oliver-Villanueva J. V., Rojas-Briales E. Land use/cover change analysis in the Mediterranean region: a regional case study of forest evolution in Castelló (Spain) over 50 years // Land Use Policy. 2022. Vol. 114. Article number: 105967. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105967.

Dhillon M. S., Kübert-Flock C., Dahms T., Rummler T., Arnault J., Steffan-Dewenter I., Ullmann T. Evaluation of MODIS, Landsat 8 and Sentinel-2 Data for Accurate Crop Yield Predictions: A Case Study Using STARFMNDVI in Bavaria, Germany // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Article number: 1830. https://doi.org/10.3390/rs15071830.

Di Gennaro S. F., Toscano P., Gatti M., Poni S., Berton A., Matese A. Spectral Comparison of UAV-Based Hyper and Multispectral Cameras for Precision Viticulture // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. No. 3. Article number: 449. https://doi.org/10.3390/rs14030449.

Eddy S., Milantara N., Sasmito S. D., Kajita T., Basyuni M. Anthropogenic Drivers of Mangrove Loss and Associated Carbon Emissions in South Sumatra, Indonesia // Forests. 2021. Vol. 12. Article number: 187. https://doi.org/10.3390/f12020187.

Elvidge C. D., Lyon R. J. Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass // Remote Sensing of Environment. 1985. Vol. 17. pp. 265–279. https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90099-9.

Ermakov N., Plugatar Y., Korzhenevskiy V., Ermakova E. Phytocoenotic map to evaluate plant diversity in eastern Crimea // Acta Horticulturae. 2021a. pp. 225–232. https://doi.org/10.17660/actahortic.2021.1324.35. EDNWWQSZB.

Ermakov N. B., Pestunov I. A., Korzhenevskiy V. V., Ermakova E. V., Rylov S. A., Trusheva N. A. Study of the diversity and mapping of xerophytic vegetation of the southeastern coast of Crimea peninsula using remote sensing data // CEUR Workshop Proceedings. Novosibirsk, 2021b. Pp. 437–445. https://doi.org/10.25743/sdm.2021.54.38.052. EDNFFUNLO.

Fan D., Ni L., Jiang X., Fang S., Wu H., Zhang X. (2020). Spatiotemporal analysis of vegetation changes along the Belt and Road Initiative region from 1982 to 2015 // IEEE Access. 2020. Vol. 8. pp. 122579–122588. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007073.

Fedorov V. M., Gorbunov R. V., GorbunovaT. Y., Kononova N. K. Long-term air temperature variability on the Crimean Peninsula // Geography and Natural Resources. 2017. Vol. 38. pp. 86–92. https://doi.org/10.1134/S1875372817010115EDNYVWWIR.

Feng D., Fu M., Sun Y., Bao W., Zhang M., Zhang Y., Wu J. How Large-Scale Anthropogenic Activities Influence Vegetation Cover Change in China? A Review // Forests. 2021. Vol. 12. Article number: 320. https://doi.org/10.3390/f12030320.

Forner A., Morán-López T., Flores-Rentería D., Aranda I., Valladares F. Fragmentation reduces severe drought impacts on tree functioning in holm oak forests // Environmental and Experimental Botany. 2020. Vol. 173. Article number: 104001. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104001.

Fuchs S., Beardsmore G., Chiozzi P., Espinoza-Ojeda O. M., Gola G., Gosnold W., Harris R., Jennings S., Liu S., Negrete-Aranda R., Neumann F., Norden B., Poort J., Rajver D., Ray L., Richards M., Smith J. D., Tanaka A., Verdoya M. A new database structure for the IHFC Global Heat Flow Database // International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics. 2021. Vol. 4. pp. 1–14. https://doi.org/10.31214/ijthfa.v4i1.62

Funk Chris, Peterson Pete, Landsfeld Martin, Pedreros Diego, Verdin James, Shukla Shraddhanand, Husak Gregory, Rowland James, Harrison Laura, Hoell Andrew, Michaelsen Joel. The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations – a new environmental record for monitoring extremes // Scientific Data. 2015. Vol. 2. Article number: 150066. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66.

Furukawa F., Laneng L. A., Ando H., Yoshimura N., Kaneko M., Morimoto J. Comparison of RGB and multispectral unmanned aerial vehicle for monitoring vegetation coverage changes on a landslide area // Drones. 2021. Vol. 5. No. 3. Article number: 97. https://doi.org/10.3390/drones5030097.

Gallardo-Salazar J. L., Pompa-García M. Detecting individual tree attributes and multispectral indices using unmanned aerial vehicles: Applications in a pine clonal orchard // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. No. 24. Article number: 4144. https://doi.org/10.3390/rs12244144.

Gandhi G. M., Parthiban B. S., Thummalu N., Christy A. NDVI: Vegetation change detection using remote sensing and GIS–A case study of Vellore District // Procedia Computer Science. 2015. Vol. 57. Pp. 1199–1210. https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.415.

García-Gómez H., Izquieta-Rojano S., Aguillaume L., González-Fernández I., Valiño F., Elustondo D., Santamaría J. M., Àvila A., Bytnerowicz A., Bermejo V. et al. Joining empirical and modeling approaches to estimate dry deposition of nitrogen in Mediterranean forests // Environmental Pollution. 2018. Vol. 243. Pp. 427–436. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.015.

Garrett B., Anderson K. Drone methodologies: Taking flight in human and physical geography // Transactions of the Institute of British Geographers. 2018. Vol. 43 (3). pp. 341–359. https://doi.org/10.1111/tran.12232.

Geri F., Amici V., Rocchini D. Human activity impact on the heterogeneity of a Mediterranean landscape // Applied geography. 2010. Vol. 30. No. 3. Pp. 370–379. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2009.10.006.

Ghorbanian A., Mohammadzadeh A., Jamali S. Linear and Non-Linear Vegetation Trend Analysis throughout Iran Using Two Decades of MODIS NDVIImagery // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. Article number: 3683. https://doi.org/10.3390/rs14153683.

Gonçalves A. C., Sousa A. M. The Fire in the Mediterranean Region: A Case Study of Forest Fires in Portugal. [Electronic resource]. Available online: https://doi.org/10.5772/intechopen.69410. (accessed on 8 August 2023).

Gorbunov R. Productivity dynamics of oak forests of the Crimean Peninsula // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 169. Article number: 03007. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016903007.

Gorbunov R., Gorbunova T., Kononova N., Priymak A., Salnikov A., Drygval A., Lebedev Y. Spatiotemporal aspects of interannual changes in precipitation in Crimea // Journal of Arid Environments. 2020. Vol. 183. Article number: 104280. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104280.

Gorbunov R., Tabunshchik V., Gorbunova T., Safonova M. Water Balance Components of Sub-Mediterranean Downy Oak Landscapes of Southeastern Crimea // Forests. 2022. Vol. 13. Article number: 1370. https://doi.org/10.3390/f13091370.

Han W., Chen D., Li H., Chang Z., Chen J., Ye L., Liu S., Wang Z. Spatiotemporal Variation of NDVI in Anhui Province from 2001 to 2019 and Its Response to Climatic Factors // Forests. 2022. Vol. 13. Article number: 1643. https://doi.org/10.3390/f13101643.

Hernández A., Miranda M., Arellano E. C., Saura S., Ovalle C. Landscape dynamics and their effect on the functional connectivity of a Mediterranean landscape in Chile // Ecological Indicators. 2005. Vol. 48. pp. 198–206. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.010.

Hernandez-Escobedo Q., Franco J. A., Perea-Moreno A.-J. GIS-Based Wind and Solar Power Assessment in Central Mexico // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Article number: 12800. https://doi.org/10.3390/app122412800.

Hidalgo-Triana N., Solakis A., Casimiro-Soriguer F., Choe H., Navarro T., Pérez-Latorre A. V., Thorne J. H. The high climate vulnerability of western Mediterranean forests // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 895. Article number: 164983. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164983.

Hobbs R. J. Remote Sensing of Spatial and Temporal Dynamics of Vegetation // Remote Sensing of Biosphere Functioning. 1990. Vol. 79. Pp. 203–219. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3302-2_10.

Höll M., Kantz H., Zhou Y. Detrended fluctuation analysis and the difference between external drifts and intrinsic diffusion-like nonstationarity // Physical Review E. 2016. Vol. 94. Article number: 042201. https://doi.org/10.1103/physreve.94.042201.

Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E., Gao X., Ferreira L. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // Remote Sensing of Environment. 2002. Vol. 83. P. 195–213. https://doi.org/10.1016/s0034-4257(02)00096-2.

Huete A., Jackson R., Post D. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds // Remote Sensing of Environment. 1985. Vol. 17. pp. 37–53. https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90111-7.

Hutchinson G. E. Concluding Remarks // Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology. 1957. Vol. 22. pp. 415–427. https://doi.org/10.1101/sqb.1957.022.01.039.

Iacopetti G., Bussotti F., Selvi F., Maggino F., Pollastrini M. Forest ecological heterogeneity determines contrasting relationships between crown defoliation and tree diversity // Forest Ecology and Management. 2019. Vol. 448. pp. 321–329. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.06.017.

Iizuka K., Itoh M., Shiodera S., Matsubara T., Dohar M., Watanabe K. Advantages of unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry for landscape analysis compared with satellite data: A case study of postmining sites in Indonesia // Cogent Geoscience. 2018. Vol. 4 (1). Article number: 1498180. https://doi.org/10.1080/23312041.2018.1498180.

Jakovljević Tamara, Marchetto Aldo, Lovreškov Lucija, Potočić Nenad, Seletković Ivan, Indir Krunoslav, Jelić Goran, Butorac Lukrecija, Zgrablić Željko, De Marco Alessandra, Simioni Guillaume, Ognjenović Mladen, Tušek Ana Jurinjak. Assessment of Atmospheric Deposition and Vitality Indicators in Mediterranean Forest Ecosystems // Sustainability. 2019. Vol. 11. Article number: 6805. https://doi.org/10.3390/su11236805.

Jełowicki Ł., Sosnowicz K., Ostrowski W., Osińska-Skotak K., Bakuła K. Evaluation of Rapeseed Winter Crop Damage Using UAV-Based Multispectral Imagery // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. Article number: 2618. https://doi.org/10.3390/rs12162618.

Jiang F., Deng M., Long Y., Sun H. Spatial pattern and dynamic change of vegetation greenness from 2001 to 2020 in Tibet, China // Frontiers in Plant Science. 2022. Vol. 13. Article number: 892625. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.892625.

Jiang F., Kutia M., Ma K., Chen S., Long J., Sun H. Estimating the aboveground biomass of coniferous forest in Northeast China using spectral variables, land surface temperature and soil moisture // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 785. Article number: 147335. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147335.

Jiang L., Bao A., Guo H., Ndayisaba F. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia // Science of the Total Environment. 2017. Vol. 599. pp. 967–980. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.012.

Johnson D. M., Rosales A., Mueller R., Reynolds C., Frantz R., Anyamba A., Pak E., Tucker C. USA Crop Yield Estimation with MODIS NDVI: Are Remotely Sensed Models Better than Simple Trend Analyses? // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. Article number: 4227. https://doi.org/10.3390/rs13214227.

Jordan C. F. Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor // Ecology. 1969. Vol. 50. pp. 663–666. https://doi.org/10.2307/1936256.

Kalisa W., Igbawua T., Henchiri M., Ali S., Zhang S., Bai Y., Zhang J. Assessment of climate impact on vegetation dynamics over East Africa from 1982 to 2015 // Scientific Reports. 2019. Vol. 9. Article number: 1–20. https://doi.org/10.1038/s41598-019-53150-0.

Kamble M. V., Ghosh K., Rajeevan M., Samui R. P. Drought monitoring over India through Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) // MAUSAM. 2010. Vol. 61. P. 537–546. https://doi.org/10.54302/mausam.v61i4.911.

Kang Y., Guo E., Wang Y., Bao Y., Bao Y., Mandula N. Monitoring Vegetation Change and Its Potential Drivers in Inner Mongolia from 2000 to 2019 // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. Article number: 3357. https://doi.org/10.3390/rs13173357.

Kantelhardt J. W. Fractal And Multifractal Time Series // Mathematics of complexity and dynamical systems. New York: Springer, 2012. Pp. 463–487. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1806-1_30.

Kauth R. J., Thomas G. S. The tasseled Cap – A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by Landsat // Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data. Indiana: Purdue University of West Lafayette, 1976. Vol. 4B. Pp. 41–51.

Kavgacı A., Balpınar N., Öner H. H., Arslan M., Bonari G., Chytrý M., Čarni A. Classification of forest and shrubland vegetation in Mediterranean Turkey // Applied Vegetation Science. 2021. Vol. 24. Article number: e12589. https://doi.org/10.1111/avsc.12589.

Keleş S., Durusoy I., Çakir G. Analysis of the changes in forest ecosystem functions, structure and composition in the Black Sea region of Turkey // Journal of Forest Research. 2016. Vol. 28. pp. 329–342. https://doi.org/10.1007/s11676-016-0322-2.

Keshta A. E., Riter J. C. A., Shaltout K. H., Baldwin A. H., Kearney M., Sharaf El-Din A., Eid E. M. Loss of Coastal Wetlands in Lake Burullus, Egypt: A GIS and Remote-Sensing Study // Sustainability. 2022. Vol. 14. Article number: 4980. https://doi.org/10.3390/su14094980.

Koba V. P., Plugatar Y. V., Shevchuk O. M., Leyba V. D., Sakhno T. M. Growth Features of Castanea sativa Mill. in Forest Stands Infected by Cryphoneciriaparasitica (Murrill) M. E. Barr. in Abkhazia // Doklady Biological Sciences. 2020. Vol. 491. pp. 54–56. https://doi.org/10.1134/s0012496620020052.

Kondratyev K. J., Manolova M. P. The radiation balance of slopes // Solar Energy. 1960. Vol. 4 (1). Pp. 14–19.

Köse S., Başkent E. Z. Investigating the 40-Year Legacy of Forest Management Plans in Eastern Black Sea Forests of Turkey // Journal of Sustainable Forestry. 2001. Vol. 14. pp. 1–19. https://doi.org/10.1300/j091v14n02_01.

Lan Y., Huang Z., Deng X., Zhu Z., Huang H., Zheng Z., Lian B., Zeng G., Tong Z. Comparison of machine learning methods for citrus greening detection on UAV multispectral images // Computers and Electronics in Agriculture. 2020. Vol. 171. Article number: 105234. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105234.

Landsberg P. T. Thermodynamics and Statistical Mechanics. Oxford: Oxford University Press, 1978. P. 11.

Li C., Jia X., Zhu R., Mei X., Wang D., Zhang X. Seasonal Spatiotemporal Changes in the NDVI and Its Driving Forces in Wuliangsu Lake Basin, Northern China from 1990 to 2020 // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Article number: 2965. https://doi.org/10.3390/rs15122965.

Li M., Yan Q., Li G., Yi M., Li J. Spatio-Temporal Changes of Vegetation Cover and Its Influencing Factors in Northeast China from 2000 to 2021 // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. Article number: 5720. https://doi.org/10.3390/rs14225720.

Li P., Wang J., Liu M., Xue Z., Bagherzadeh A., Liu M. Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate on the Loess Plateau from 1985 to 2015 // Catena. 2021. Vol. 203. Article number: 105331. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105331.

Li Z., Chen Y., Li W., Deng H., Fang G. Potential impacts of climate change on vegetation dynamics in Central Asia // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2015. Vol. 120, No. 24. pp. 12345–12356. https://doi.org/10.1002/2015JD023618.

Librán-Embid F., Klaus F., Tscharntke T., Grass I. Unmanned aerial vehicles for biodiversity-friendly agricultural landscapes-A systematic review // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 732. Article number: 139204. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139204.

Liu B., Pan L., Qi Y., Guan X., Li J. Land Use and Land Cover Change in the Yellow River Basin from 1980 to 2015 and Its Impact on the Ecosystem Services // Land. 2021. Vol. 10. Article number: 1080. https://doi.org/10.3390/land10101080.

Liu D., Ogaya R., Barbeta A., Yang X., Peñuelas J. Long-term experimental drought combined with natural extremes accelerate vegetation shift in a Mediterranean holm oak forest // Environmental and Experimental Botany. 2018. Vol. 151. Pp. 1–11.

Llorens P., Francisco D. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions: A review of studies in Europe // Journal of Hydrology. 2007. Vol. 335, Issues 1–2. pp. 37–54. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.032.

Lloret F., Calvo E., Pons X., Díaz-Delgado R. Wildfires and landscape patterns in the Eastern Iberian Peninsula // Landscape Ecology. 2002. Vol. 17. pp. 745–759.

Long Q., Wang F., Ge W., Jiao F., Han J., Chen H., Roig F. A., Abraham E. M., Xie M., Cai L. Temporal and Spatial Change in Vegetation and Its Interaction with Climate Change in Argentina from 1982 to 2015 // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Article number: 1926. https://doi.org/10.3390/rs15071926.

Lu H., Fan T., Ghimir P., Deng L. Experimental evaluation and consistency comparison of UAV multispectral minisensors // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, No. 16. Article number: 2542. https://doi.org/10.3390/rs12162542.

Lupyan E. A., Bartalev S. A., Krasheninnikova Yu. S., Plotnikov D. E., Tolpin V. A., Uvarov I. A. Analysis of winter crops development in the southern regions of the European part of Russia in spring of 2018 with use of remote monitoring // Sovremennye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2019. Vol. 15, No. 2. Pp. 272–276. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-2-272-276.

Marchi M., Castellanos-Acuna D., Hamann A., Wang T., Ray D. Menzel A. ClimateEU, scale-free climate normals, historical time series, and future projections for Europe // Scientific Data. 2020. Vol. 7. Article number: 428. https://doi.org/10.1038/s41597-020-00763-0.

Marino C., Manca G., Matteucci G., Mugnozza G. S. Climate change in the Mediterranean basin: a case study on carbon cycle in a forest of southern Italy // Forest@ – Journal of Silviculture and Forest Ecology. 2005. Vol. 2. pp. 52–65. https://doi.org/10.3832/efor0259-0020052.

Matsushita B., Yang W., Chen J., Onda Y., Qiu G. Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High-density Cypress Forest // Sensors. 2007. Vol. 7. pp. 2636–2651. https://doi.org/10.3390/s7112636.

Mayeux H. S., Johnson H. B., Polley H. W. Global change and vegetation dynamics // Noxious range weeds. Boca Raton: CRC Press.1992. pp. 62–74

McDaniel K. C., Haas R. H. Assessing mesquite-grass vegetation condition from Landsat // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1982. Vol. 48, No. 3. pp. 441–450.

MERRA–2 meteorologicalre-analysis. [Electronicresource]. Availableonline:https://www.soda-pro.com/web-services/meteo-data/merra (accessed on 8 August 2023).

Miles J. Vegetation Dynamics. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 1979. 80 p.

Modica G., Merlino A., Solano F., Mercurio R. An index for the assessment of degraded Mediterranean forest ecosystems // Forest Systems. 2015. Vol. 24. Article number: e037. https://doi.org/10.5424/fs/2015243-07855.

Molowny-Horas R., Basnou C., Pino J. A multivariate fractional regression approach to modeling land use and cover dynamics in a Mediterranean landscape // Computers, Environment and Urban Systems. 2015. Vol. 54. pp. 47–55.

Morán-Ordóñez A., Ramsauer J., Coll L., Brotons L., Ameztegui A. Ecosystem services provision by Mediterranean forests will be compromised above 2 warming // Global Change Biology. 2021. Vol. 27. pp. 4210–4222. https://doi.org/10.1111/gcb.15745.

Morán-Ordóñez A., Roces-Díaz J. V., Otsu K., Ameztegui A., Coll L., Lefevre F., Retana J., Brotons L. The use of scenarios and models to evaluate the future of nature values and ecosystem services in Mediterranean forests // Regional Environmental Change. 2018. Vol. 19. pp. 415–428. https://doi.org/10.1007/s10113-018-1408-5.

Moreno-de-las-Heras M., Lindenberger F., Latron J., Lana-Renault N., Llorens P., Arnáez J., Romero-Díaz A., Gallart F. Hydro-geomorphological consequences of the abandonment of agricultural terraces in the Mediterranean region: Key controlling factors and landscape stability patterns // Geomorphology. 2019. Vol. 333. pp. 73–91.

Mu Z., Asensio D., Llusià J., Filella I., Ogaya R., Yi Z., Peñuelas J. Annual and seasonal variations in soil volatile organic compound concentrations in a Mediterranean shrubland and holm oak forest // Geoderma. 2022. Vol. 405. Article number: 115401.

Muñoz Sabater J. ERA5-Land Monthly Averaged Data from 1981 to Present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). Available online: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.68d2bb30?tab=overview (accessed on 8 August 2023).

National Atlas of Ukraine / NAS of Ukraine, Institute of geography, State Service of Geodesy, cartography and cadastre, chief editor L. G. Rudenko, Chairman Editor Kol. B. E. Paton. Kiev: Cartography, 2007. 435 p.

Njuki S. M., Mannaerts C. M., Su Z. Accounting for Turbulence-Induced Canopy Heat Transfer in the Simulation of Sensible Heat Flux in SEBS Model // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Article number: 1578. https://doi.org/10.3390/rs15061578.

Nunes L. J. R., Meireles C. I. R., Gomes C. J. P., Ribeiro N. M. C. A. The Impact of Climate Change on Forest Development: A Sustainable Approach to Management Models Applied to Mediterranean-Type Climate Regions // Plants. 2021. Vol. 11. Article number: 69. https://doi.org/10.3390/plants11010069.

Ogaya R., Barbeta A., Başnou C., Peñuelas J. Satellite data as indicators of tree biomass growth and forest dieback in a Mediterranean holm oak forest // Annals of Forest Science. 2014. Vol. 72. pp. 135–144. https://doi.org/10.1007/s13595-014-0408-y.

Ogaya R., Peñuelas J. Climate Change Effects in a Mediterranean Forest Following 21 Consecutive Years of Experimental Drought // Forests. 2021. Vol. 12. Article number: 306. https://doi.org/10.3390/f12030306.

Opoku A. Biodiversity and the built environment: Implications for the Sustainable Development Goals (SDGs) // Resources, Conservation and Recycling. 2019. Vol. 141. pp. 1–7. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.011.

Orenstein D. E. The Cultural Ecosystem Services of Mediterranean Pine Forests // Pines and Their Mixed Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin. Managing Forest Ecosystems. 2021. Vol. 38. pp. 631–655. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63625-8_30.

Ozcelik R. Tree species diversity of natural mixed stands in eastern Black Sea and western Mediterranean region of Turkey // Journal of Environmental Biology. 2009. Vol. 30. pp. 761–766.

Paoletti E. UV-B and Mediterranean forest species: Direct effects and ecological consequences // Environmental Pollution. 2005. Vol. 137. Issue 3. pp. 372–379.

Papadimitriou F. Artificial Intelligence in modelling the complexity of Mediterranean landscape transformations // Computers and Electronics in Agriculture. 2012. Vol. 81. pp. 87–96.

Parcerisas L., Marull J., Pino J., Tello E., Coll F., Basnou C. Land use changes, landscape ecology and their socioeconomic driving forces in the Spanish Mediterranean coast (El Maresme County, 1850–2005) // Environmental Science Policy. 2012. Vol. 23. pp. 120-132.

Partington J. R. An Advanced Treatise on Physical Chemistry. Available online: https://archive.org/details/advancedtreatise0003jrpa/page/n5/mode/2up (accessed on 8 August 2023).

Peña-Angulo D., Khorchani M., Errea P., Lasanta T., Martínez-Arnáiz M., Nadal-Romero E. Factors explaining the diversity of land cover in abandoned fields in a Mediterranean mountain area // Catena. 2019. Vol. 181. Article number: 104064.

Peñuelas J., Sardans J., Filella I., Estiarte M., Llusià J., Ogaya R., Carnicer J., Bartrons M., Rivas-Ubach A., Grau O. et al. Impacts of Global Change on Mediterranean Forests and Their Services // Forests. 2017. Vol. 8. Article number: 463. https://doi.org/10.3390/f8120463.

Pérez-Girón J. C., Álvarez-Álvarez P., Díaz-Varela E. R., Lopes D. M. M. Influence of climate variations on primary production indicators and on the resilience of forest ecosystems in a future scenario of climate change: Application to sweet chestnut agroforestry systems in the Iberian Peninsula // Ecological Indicators. 2020. Vol. 113. pp. 106–199.

Perrot P. A to Z of Thermodynamics. Oxford: Oxford University Press. 1998. 329 p.

Piao S., Fang J., Zhou L., Zhu B., Tan K., Tao S. Changes in vegetation net primary productivity from 1982 to 1999 in China // Global Biogeochemical Cycles. 2005. Vol. 19, No. 2. https://doi.org/10.1029/2004GB002274.

Potapov P., Hansen M. C., Kommareddy I., Kommareddy A., Turubanova S., Pickens A., Adusei B., Tyukavina A., Ying Q. Landsat Analysis Ready Data for Global Land Cover and Land Cover Change Mapping // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. Article number: 426. https://doi.org/10.3390/rs12030426.

Prigogine I., Defay R. Chemical Thermodynamics. London: Longmans, Green Co. 1954. pp. 22–23.

Qi J., Chehbouni A., Huete A., Kerr Y., Sorooshian S. A modified soil adjusted vegetation index // Remote Sensing of Environment. 1994. Vol. 48. pp. 119–126. https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1.

Quézel F., Médail R., Loisel Barbero M. Biodiversity and conservation of forest species in the Mediterranean basin // Unasylva. 1999. Vol. 50, No. 197. pp. 21–28.

Rasmussen J., Azim S., Boldsen S. K., Nitschke T., Jensen S. M., Nielsen J., Christensen S. The challenge of reproducing remote sensing data from satellites and unmanned aerial vehicles (UAVs) in the context of management zones and precision agriculture // Precision Agriculture. 2021. Vol. 22 (3). pp. 834–851. https://doi.org/10.1007/s11119-020-09759-7.

Requena-Mullor J. M., Reyes A., Escribano P., Cabello J. Assessment of ecosystem functioning from space: Advancements in the Habitats Directive implementation // Ecological Indicators. 2018. Vol. 89. pp. 893–902.

Richardson A. J., Everitt J. H. Using spectral vegetation indices to estimate rangeland productivity // Geocarto International. 1992. Vol. 7, No. 1. pp. 63–69. doi:10.1080/10106049209354353.

Riihimäki H., Luoto M., Heiskanen J. Estimating fractional cover of tundra vegetation at multiple scales using unmanned aerial systems and optical satellite data. Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 224. pp. 119–132.

Romero-Calcerrada R., Perry G. L. W. The role of land abandonment in landscape dynamics in the SPA 'Encinares del rio Alberche y Cofio' Central Spain, 1984–1999 // Landscape Urban Plann. 2004. Vol. 66. pp. 217–232.

Rouse L. M., Tabaldiev K., Matuzeviciute G. M. Exploring Landscape Archaeology and UAV-Based Survey in the Kochkor Valley, Kyrgyzstan // Journal of Field Archaeology. 2022. Vol. 47 (1). pp. 32–53.

Russo D. Effects of Land Abandonment on Animal Species in Europe: Conservation and Management Implications. Napoli: Universitàdegli Studi de Napoli Federic, 2006. 51 p.

Saikia A. NDVI variability in North East India // Scottish Geographical Journal. 2009. Vol. 125, No. 2. pp. 195–213. https://doi.org/10.1080/14702540903071113.

Senf C., Leitão P. J., Pflugmacher D., van der Linden S., Hostert P. Mapping land cover in complex Mediterranean landscapes using Landsat: Improved classification accuracies from integrating multi-seasonal and synthetic imagery // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 156. pp. 527–536.

Serra P., Ponsa X., Saurí D. Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: A spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors // Applied Geography. 2008. Vol. 28. pp. 189–209. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.02.001.

Shadchinov S. M. Dependence of the Normalized Difference Vegetation Index Level on the Spatial Structure of the Landscape and Its Time Variability Using the Example of the West End of the Crimean Peninsula (Tarkhankut Peninsula) // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. Vol. 57. pp. 1586–1595. https://doi.org/10.1134/s0001433821120185.

Shibani N., Pandey A., Satyam V. K., Bhari J. S., Karimi B. A., Gupta S. K. Study on the variation of NDVI, SAVI and EVI indices in Punjab State, India // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1110, No. 1. Article number: 012070. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1110/1/012070.

Shinkarenko S., Solodovnikov D., Bartalev S., Vasilchenko A., Vypritskii A. Dynamics of the reservoir's areas of the Crimean Peninsula // Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space. 2021. Vol. 18. pp. 226–241. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-226-241.

Sirami C., Nespoulous A., Cheylan J. P., Marty P., Hvenegaard G. T., Geniez P., Schatz B., Martin J. L. Long-term anthropogenic and ecological dynamics of a Mediterranean landscape: Impacts on multiple taxa // Landscape and Urban Planning. 2010. Vol. 96. Issue 4. pp. 214–223.

Skorokhod E. Y., Churilova T. Y., Efimova T. V., Moiseeva N. A., Suslin V. V. Bio-Optical Characteristics of the Black Sea Coastal Waters near Sevastopol: Assessment of the MODIS and VIIRS Products Accuracy // Physical Oceanography. 2021. Vol. 28. pp. 215-227. https://doi.org/10.22449/1573-160x-2021-2-215-227.

Soulis K. X., Generali K. A., Papadaki C., Theodoropoulos C., Psomiadis E. Hydrological Response of Natural Mediterranean Watersheds to Forest Fires // Hydrology. 2021. Vol. 8. Article number: 15. https://doi.org/10.3390/hydrology8010015.

Sousa D., Davis F. W. Scalable mapping and monitoring of Mediterranean-climate oak landscapes with temporal mixture models // Remote Sensing of Environment. 2020. Vol. 247. Article number: 111937.

Suárez-Muñoz M., Bonet-García F. J., Navarro-Cerrillo R., Herrero J., Mina M. Forest management scenarios drive future dynamics of Mediterranean planted pine forests under climate change // Landscape Ecology. 2023. Vol. 38. pp. 2069–2084. https://doi.org/10.1007/s10980-023-01678-y.

Sun G.-Q., Li L., Li J., Liu C., Wu Y.-P., Gao S., Wang Z., Feng G.-L. Impacts of climate change on vegetation pattern: Mathematical modeling and data analysis // Physics of Life Reviews. 2022. Vol. 43. pp. 239–270. https://doi.org/10.1016/j.plrev.2022.09.005.

Sun J., Hou G., Liu M., Fu G., Zhan T., Zhou H., Tsunekawa A., Haregeweyn N. Effects of climatic and grazing changes on desertification of alpine grasslands, Northern Tibet // Ecological Indicators. 2019. Vol. 107. Article number: 105647. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105647.

Tabara D., Sauri D., Cerdan R. Forest fire risk management and public participation in changing socioenvironmental conditions: a case study in a Mediterranean region // Risk Analysis. 2003. Vol. 23. pp. 249–260. https://doi.org/10.1111/1539-6924.00305.

Tabunshchik V. A. The distribution of the values of the NDVI on the territory of the Razdolnensky district of the Republic of Crimea in January-June 2018 // Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions. 2019. Vol. 5, No. 2. pp. 225–242.

Terez E. I., Terez G. A. Investigation of atmospheric transmission in the Crimea (Ukraine) in the twentieth century // Journal of Applied Meteorology. 2002. Vol. 41, No. 10. pp. 1060–1063.

Tong S., Zhang J., Bao Y., Lai Q., Lian X., Li N., Bao Y. Analyzing vegetation dynamic trend on the Mongolian Plateau based on the Hurst exponent and influencing factors from 1982–2013 // Journal of Geographical Sciences. 2018. Vol. 28. pp. 595–610. https://doi.org/10.1007/s11442-018-1493-x.

Vecellio D. J., Wolf S. T., Cottle R. M. et al. Utility of the Heat Index in defining the upper limits of thermal balance during light physical activity (PSU HEAT Project) // International Journal of Biometeorology. 2022. Vol. 66. pp. 1759–1769. https://doi.org/10.1007/s00484-022-02316-z.

Verrall B., Pickering C. M. Alpine vegetation in the context of climate change: A global review of past research and future directions // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 748. Article number: 141344. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141344.

Wang J., Buttar N. A., Hu Y., Lakhiar I. A., Javed Q., Shabbir A. Estimation of Sensible and Latent Heat Fluxes Using Surface Renewal Method: Case Study of a Tea Plantation // Agronomy. 2021. Vol. 11. Article number: 179. https://doi.org/10.3390/agronomy11010179.

Wang J., Zhao J., Zhou P., Li K., Cao Z., Zhang H., Han Y., Luo Y., Yuan X. Study on the Spatial and Temporal Evolution of NDVI and Its Driving Mechanism Based on Geodetector and Hurst Indexes: A Case Study of the Tibet Autonomous Region // Sustainability. 2023. Vol. 15. Article number: 5981. https://doi.org/10.3390/su15075981.

Wang Y., Zhang Z., Chen X. The Dominant Driving Force of Forest Change in the Yangtze River Basin, China: Climate Variation or Anthropogenic Activities? // Forests. 2022. Vol. 13. Article number: 82. https://doi.org/10.3390/f13010082.

Waseem S., Khayyam U. Loss of vegetative cover and increased land surface temperature: A case study of Islamabad, Pakistan // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 234. pp. 972–983. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.228.

Wilcox K. Chile's native forests. A conservation legacy. Ancient Forest International (AFI), NW Wild Books, Redway, CA, USA, 1996. 148 p.

Wu Z., Lei S., Bian Z., Huang J., Zhang Y. Study of the desertification index based on the albedo-MSAVI feature space for semi-arid steppe region // Environmental Earth Sciences. 2019. Vol. 78. Article number: 232. https://doi.org/10.1007/s12665-019-8111-9.

Yang J., Wan Z., Borjigin S., Zhang D., Yan Y., Chen Y., Gu R., Gao Q. Changing Trends of NDVI and Their Responses to Climatic Variation in Different Types of Grassland in Inner Mongolia from 1982 to 2011 // Sustainability. 2019. Vol. 11. Article number: 3256. https://doi.org/10.3390/su11123256.

Yurova A. Y., Volodin E. M. Coupled simulation of climate and vegetation dynamics // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2011. Vol. 47. pp. 531–539. https://doi.org/10.1134/S0001433811050124.

Zhou G., Lucas-Borja M. E., Eisenhauer N., Eldridge D. J., Liu S., Delgado-Baquerizo M. Understorey biodiversity supports multiple ecosystem services in mature Mediterranean forests // Soil Biology and Biochemistry. 2022. Vol. 172. Article number: 108774. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108774.

Zhou Z., Ding Y., Shi H., Cai H., Fu Q., Liu S., Li T. Analysis and prediction of vegetation dynamic changes in China: Past, present and future // Ecological Indicators. 2020. Vol. 117. pp. 106–642. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106642.

Научное издание

Р. В. Горбунов, М. С. Сафонова, В. А. Табунщик,
Т. Ю. Горбунова

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ НИЗКОГОРНЫХ СУБСРЕДИЗЕМНОМОРСКИХ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ (НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОГО КРЫМА)

Подписано в печать с оригинал-макета 08.12.2023
Формат 84 х 108 $^{1}/_{16}$. Гарнитура «Nimes New Roman».
Печать . Условн. печ. л.
Тираж экз. Заказ №

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТИПОГРАФИЯ «АРИАЛ».
295015, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Севастопольская, 31-а/2,
тел.: +7 978 71 72 901, e-mail: it.arial@yandex.ru, сайт: arialprint.ru

Отпечатано с оригинал-макета в типографии «ИТ «АРИАЛ».
295015, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Севастопольская, 31-а/2,
тел.: +7 978 71 72 901, e-mail: it.arial@yandex.ru, сайт: arialprint.ru