

ИТОГОВЫЙ ОТЧЁТ

о проделанной работе обладателей грантов

Государственного Совета Республики Крым молодым учёным

Республики Крым имени Н. Я. Данилевского

ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ФАКТОРЫ ОРГАНИЗАЦИИ ЛАНДШАФТОВ ГОРНОГО КРЫМА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Науки об окружающей и природной среде

Кутикова Екатерина Викторовна

Аспирантка третьего года обучения 1.6.14 Геоморфология и палеогеография

Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ НАУЧНОГО ПРОЕКТА

Исследование направлено на разработку целостной модели пространственной организации ландшафтов Горного Крыма, где рельеф выступает как главный системообразующий фактор. Работа построена на принципе иерархического анализа, охватывающего три пространственно-временных уровня: макро-, мезо- и локальный. На каждом уровне использованы современные геоинформационные (Qgis Desktop 3.40.12) и статистические методы для верификации и развития классических ландшафтных концепций.

Систематизированы современные концепции организации горных ландшафтов (высотная поясность, асимметрия склонов, бассейновый и катенарный подходы, мозаично-блочная структура), обоснована их применимость к Горному Крыму и определена ключевая роль рельефа как условия и фактора ландшафтной дифференциации.

Показано, что горный рельеф – это одновременно условие (статика, каркас) и фактор (динамика, процессы) формирования ландшафтов. Современный анализ требует перехода от статичного описания к изучению трёхмерной динамической системы.

На макрорегиональном уровне разработана трехуровневая иерархическая модель (уровень → зона → пояс), демонстрирующая главные закономерности: выраженную вертикальную поясность, резкую асимметрию северного (лесостепного) и южного (субсредиземноморского) макросклонов, а также уникальность ландшафтов Южного берега Крыма. Структурированная табличная и картографическая модель, служащая основой для всего последующего анализа.

Мезорегиональные модели охватывают исследование организации ландшафтов внутри поясов. Проанализированы позиционные ряды катенарных связей и потоков вещества/энергии от водораздела к подножию. Методом анализа фактора видимости неба (Sky View Factor) количественно оценена и картографирована степень открытости/закрытости склонов, выявлена их связь с морфометрией рельефа. Установлена сильная связь SVF с крутизной и слабая – с абсолютной высотой.

Получен основной результат этого раздела – интерактивная веб-карта, объединяющая данные по открытости склонов, ландшафтному уровню, крутизне и экспозиции, представленная на сайте открытого доступа (ссылка открытого доступа <http://ch808124.tw1.ru>). Разработана интерактивная веб-карта служит основой для комплексного анализа.

Локальная модель представлена на примере ключевого участка предгорья статистическими методами (корреляция, ANOVA, множественная регрессия) установлено, что экспозиция склона является доминирующим геоморфологическим фактором, определяющим пространственное распределение растительности (по индексу EVI) на локальном уровне, тогда как влияние других факторов (крутизна, индекс влажности TWI, форма рельефа) оказалось статистически незначимым. На локальном уровне экспозиция склона – доминирующий фактор. Наиболее благоприятные условия для растительности – на северо-восточных склонах. Влияние крутизны, влажности (TWI) и формы рельефа оказалось статистически незначимым в условиях данного участка.

Цифровая модель верификация на основе кластерного анализа отражает многомерную кластеризацию (K-means) по комплексу факторов (высота, крутизна, TWI,

EVI) и автоматическое выделение ландшафтных уровней и зоны. Кластеризация на 2 класса чётко разделила низкогорный и среднегорный ландшафтные уровни, подтвердив экспертные карты Г.Е. Гришанкова. Кластеризация на 5 классов выявила ландшафтные зоны, в основном соответствующие классификации Г.Е. Гришанкова. Расхождения в западной части объясняются современной однородностью растительного покрова, которую "увидел" алгоритм. Полученные цифровые границы в целом подтвердили корректность экспертной ландшафтной карты Г.Е. Гришанкова, а расхождения интерпретированы как отражение современной пространственной однородности растительного покрова.

В работе рассмотрены прикладные аспекты полученных результатов. На основе временных рядов спутниковых данных (MODIS) разработан интегральный индекс уязвимости ландшафтов к рекреационным нагрузкам, учитывающий среднюю продуктивность (EVI), скорость весеннего восстановления и сезонную амплитуду.

Предложена формула расчета индекса уязвимости ландшафтов -

$$\text{Index}_{\text{уязвимости}} = (1 - \text{средний } \text{EVI}_{\text{norm}}) + (1 - \text{скорость восстановления}_{\text{norm}}) + \text{амплитуда}_{\text{norm}}$$

Составлена карта уязвимости ландшафтов к рекреационным нагрузкам, и проведён анализ её пересечения с сетью пеших туристических маршрутов. Наложены карты уязвимости ландшафтов на сеть из 114 пеших туристических маршрутов. Установлено, что большинство маршрутов проходят по слабо- и умеренно уязвимым ландшафтам, но некоторые затрагивают высоко уязвимые зоны, требующие контроля.

Ключевые слова: геоморфологические условия и факторы, ландшафтная организация, ГИС-технологии, цифровая модель рельефа (ЦМР, DEM), вегетационный индекс (EVI), Sky View Factor (SVF), кластерный анализ (K-means), статистический анализ (корреляция, регрессия, ANOVA), пространственное моделирование, интегральный индекс уязвимости ландшафтов, Горный Крым.

2. ЗАЯВЛЕННЫЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ НАУЧНОГО ПРОЕКТА, ПРЕДЛАГАЕМЫЕ МЕТОДЫ, ПОДХОДЫ, ИДЕИ, РАБОЧИЕ ГИПОТЕЗЫ, КОТОРЫЕ ПРЕДЛАГАЛИСЬ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НАУЧНОГО ПРОЕКТА

Цель исследования – разработка целостной иерархической модели организации ландшафтов Горного Крыма, где рельеф выступает как главный системообразующий фактор на всех пространственно-временных уровнях на основе объединения ландшафтных концепций с современными методами дистанционного зондирования, геоинформационного и статистического анализа.

Задачи исследования:

- Изучить теоретико-методические основы организации ландшафтов в зависимости от геоморфологических условий;
- Рассмотреть модель организации ландшафтов Горного Крыма на макрорегиональном уровне, включающую: ландшафтные уровни, ландшафтные зоны, ландшафтные пояса;
- Разработать модель организации ландшафтов Горного Крыма на мезорегиональном

- уровне, включающую: позиционные ряды, группы закрытых и открытых склонов;
- Смоделировать организацию ландшафтов Горного Крыма на локальном уровне - микрозоны, крутизна, экспозиция склонов и др.
 - Создать систему взаимосвязанных карт, выполненных в ГИС-программе (Qgis Desktop 3.40.12) организации ландшафтов Горного Крыма в зависимости от геоморфологических условий и факторов.
 - Определить прикладные аспекты использования полученных результатов. Разработать карты уязвимости ландшафтов к рекреационным нагрузкам, лесным пожарам.

Методы исследования

В проекте заявлено применение комплексной методологии, сочетающей традиционные ландшафтные подходы с современными цифровыми технологиями. Основу составляет системный анализ, рассматривающий рельеф как каркасообразующий фактор ландшафтной организации на разных иерархических уровнях.

Ключевые методы сгруппированы по следующим направлениям:

- дистанционное зондирование (ДЗЗ) и спектральный анализ - использование разновременных спутниковых снимков (Landsat-8, Terra/Aqua MODIS) для оценки состояния растительности; применение вегетационного индекса EVI, в качестве интегрального индикатора состояния ландшафтов. Акцент делается на EVI как наиболее устойчивом к влиянию атмосферы и почвенного фона;
- геоинформационное моделирование и анализ (ГИС) - обработка данных в среде QGIS, построение и анализ производных карт на основе цифровой модели рельефа SRTM: крутизна, экспозиция и др.;
- математико-статистические методы - корреляционный и регрессионный анализ для выявления и количественной оценки связей между геоморфологическими параметрами и характеристиками растительности (EVI);
- традиционные ландшафтные методы - полевые исследования (маршрутные наблюдения, ландшафтное профилирование, описания) для верификации результатов дистанционного анализа, сбора эталонных данных и детализации моделей на ключевых участках.
- Картографический метод – создание и анализ системы взаимосвязанных тематических карт.

Основная логика исследования: данные ДЗЗ и ГИС-анализа (цифровая модель рельефа, вегетационные индексы) служат для выявления пространственных закономерностей и построения количественных моделей. Эти результаты затем проверяются и детализируются с помощью полевых исследований. Такой интегративный подход позволяет перейти от качественного описания к количественному анализу и моделированию организации ландшафтов Горного Крыма.

Подходы, идеи, рабочие гипотезы, которые предлагались для решения задач научного проекта

Подход пространственной иерархии и уровневой организации.

Идея: ландшафтная структура Горного Крыма не может быть адекватно описана с единой детализацией. Её анализ требует иерархического подхода, где на каждом уровне (макро-, мезо-, локальном) рельеф проявляет себя по-разному, выступая то как фон (условие), то как активный процесс (фактор).

Рабочие гипотезы:

- на макрорегиональном уровне (весь Горный Крым) рельеф определяет ландшафтную структуру преимущественно через абсолютную высоту (формируя вертикальную поясность) и ориентацию макросклонов (создавая асимметрию);
- на мезорегиональном уровне (в пределах поясов) ведущую роль играют позиционные катенарные связи (перераспределение вещества/энергии по склону) и степень инсоляции/закрытости склонов (SVF), что формирует мозаику местностей;
- на локальном уровне (урочища и фации) ключевыми становятся микрогеоморфологические параметры (экспозиция, форма и крутизна микросклона), напрямую определяющие экологические условия для растительности.

Подход геоморфологического детерминизма как системообразующего каркаса.

Идея: рельеф является первичным и непреходящим каркасом, который предопределяет распределение всех других компонентов ландшафта (климата, вод, почв, растительности) через перераспределение тепла и влаги. Организацию ландшафтов можно «дешифровать» через анализ геоморфологических параметров.

Рабочие гипотезы:

- вегетационный индекс (EVI) как интегральный отклик экосистемы сильно и статистически значимо коррелирует с комбинацией геоморфологических переменных (высота, крутизна, экспозиция, TWI), что позволяет количественно оценить вклад рельефа;
- асимметрия ландшафтной структуры северного и южного макросклонов является прямым следствием их орографического барьерного эффекта и разницы в радиационном балансе, что должно чётко фиксироваться в значениях EVI и SVF.

Подход количественного и интегрального анализа (синтез «классики» и «цифры»).

Идея: традиционные качественные ландшафтные схемы (например, Г.Е. Гришанкова) могут быть верифицированы и дополнены методами объективной количественной классификации на основе комплекса цифровых данных. Современные ГИС- и ДЗЗ-методы не противоречат, а усиливают классические концепции.

Рабочие гипотезы:

- результаты автоматической кластеризации (K-means) территории по набору растров (рельеф, EVI, TWI) будут в значительной степени совпадать с границами ландшафтных уровней и зон на традиционной карте, подтверждая её объективность;

- расхождения между результатами кластеризации и экспертной картой укажут на зоны, где либо произошли современные изменения растительного покрова, либо требуют уточнения границ на основе объективных данных;
- Sky View Factor (SVF) является более точным и объективным количественным аналогом качественной концепции «открытых/закрытых склонов».

Подход прикладного синтеза: от модели к оценке функции и уязвимости.

Идея: созданные иерархические и цифровые модели ландшафтной организации – не самоцель. Они должны служить основой для оценки ключевых функций и уязвимости ландшафтов, обеспечивая научную базу для принятия управленческих решений.

Рабочие гипотезы:

- устойчивость/уязвимость ландшафта к внешним воздействиям (например, к рекреации) может быть количественно оценена через динамику вегетационных индексов (средняя продуктивность, скорость восстановления, амплитуда колебаний);
- наиболее уязвимыми к рекреационной нагрузке и пожарной опасности окажутся не только традиционно признаваемые сухие южные склоны, но и определённые типы местностей в предгорьях с низкой биомассой и медленным восстановлением;
- наложение сети существующих туристических маршрутов на карту уязвимости выявит потенциальные конфликтные зоны, требующие регламентации нагрузки или реконструкции маршрутов.

Обобщающая идея: Пространственная организация ландшафтов Горного Крыма представляет собой иерархическую систему, детерминированную геоморфологическим каркасом. Эта система может быть адекватно расшифрована и смоделирована только через синтез классических ландшафтных концепций, полевых исследований и современных методов пространственного анализа (ГИС, ДЗЗ, математической статистики), что открывает путь к точной оценке их состояния, функций и уязвимости, и решения ряда практических задач.

3. ВСЕ ЗАПЛАНИРОВАННЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДОСТИГНУТЫ

4. СВЕДЕНИЯ О ФАКТИЧЕСКИ ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ, ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Описание методов проведения исследований

В проекте реализована интегративная система методов, сочетающая традиционные ландшафтные подходы с современными технологиями цифрового анализа. Все методы сгруппированы по этапам и ключевым задачам исследования.

Методы сбора и первичной подготовки данных

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) - получение актуальной, пространственно-непрерывной и многолетней информации о состоянии растительного покрова. Используются архивы спутниковых снимков среднего и высокого разрешения: Landsat 8 (OLI) - для детального анализа на локальных участках (разрешение 30 м), сезонной динамики и расчета вегетационного индекса EVI; Terra/Aqua MODIS - для анализа многолетней динамики и построения временных рядов EVI на макро- и мезоуровне благодаря высокой периодичности съемки (14 дней). Предварительная радиометрическая и атмосферная коррекция снимков, их привязка к единой системе координат (WGS 84 / UTM zone 36N).

Полевые ландшафтные исследования. Верификация и уточнение данных ДЗЗ, сбор эталонной информации, детальное изучение ключевых участков. Маршрутные наблюдения: визуальная фиксация состояния растительности, почв, форм рельефа. Ландшафтное профилирование - закладка комплексных трансект от водораздела к подножию для изучения катенарных связей. Описания геоботанических площадок: фиксация видового состава, проективного покрытия, фенологической фазы растительности для корреляции со значениями вегетационных индексов.

Методы анализа и моделирования (ГИС-технологии и статистические)

Геоинформационное картографирование и анализ. Создание цифровой основы, пространственный анализ и визуализация результатов. В среде QGIS построение производных карт рельефа из SRTM; карта крутизны склонов (Slope); карта экспозиции склонов (Aspect); карта топографического индекса влажности (TWI) – для моделирования потенциального переувлажнения; карта фактора видимости неба (Sky View Factor - SVF) – для количественной оценки открытости/закрытости склонов.

Метод зональной статистики (Zonal Statistics): расчет средних значений растровых данных (EVI, крутизна, TWI) внутри векторных контуров (ландшафтных единиц, полигонов форм рельефа).

Векторный анализ - наложение слоев (например, туристических маршрутов на карту уязвимости), буферизация, вычисление площадей.

Математико-статистические методы

Выявление, количественная оценка и проверка значимости связей между параметрами (в т.ч. с помощью ПО JASP, R):

Корреляционный анализ (Спирмена/Пирсона) - оценка силы и направления линейной связи между парными параметрами (например, EVI и крутизна склона).

Дисперсионный анализ (ANOVA) с пост-хок тестом Тьюки - для сравнения средних значений (например, EVI) между тремя и более группами (например, склонами разной экспозиции) и определения статистически значимых различий.

Множественная линейная регрессия - для построения модели, описывающей зависимость целевой переменной (например, EVI) от нескольких предикторов

(экспозиция, крутизна, TWI, тип местности) одновременно и оценки вклада каждого фактора.

Методы автоматизированной классификации и моделирования

Объективное выделение типов ландшафтных структур на основе комплекса данных.

Кластерный анализ (алгоритм K-means): беспиксельная классификация территории по набору растровых слоев-предикторов (высота, крутизна, TWI, EVI) для выявления однородных областей. Применялся с разным числом кластеров (K=2, 5, 13) для анализа на разных уровнях генерализации.

Моделирование индексов уязвимости: Разработка и расчет комплексного показателя на основе нормализованных и взвешенных производных временных рядов EVI (среднее значение, амплитуда, скорость восстановления).

Методы интерпретации и синтеза

Сравнительно-географический и картографический методы. Выявление пространственных закономерностей и трендов. Наложение и визуальное сравнение тематических карт (геоморфологических, кластерных, вегетационных, ландшафтных), анализ их взаимного соответствия и расхождений.

Системный и ландшафтно-генетический анализ. Объяснение выявленных структур с позиций взаимосвязи компонентов и исторического развития. Интерпретация статистических связей и кластеров через призму известных ландшафтообразующих процессов (денудация, аккумуляция, инсоляция, барьерный эффект). Рассмотрение ландшафта как целостной системы, где рельеф определяет перераспределение тепла и влаги.

Метод веб-картографии

Разработана интерактивная публикация и распространение результатов. Создание на основе ГИС-проекта веб-приложения (с использованием плагина QGIS2Web), позволяющего пользователю самостоятельно визуализировать и анализировать слои данных (SVF, ландшафтные уровни, экспозицию).

Общая логика применения методов:

Подготовительный этап: сбор спутниковых данных и ЦМР - подготовка растровых наборов.

Этап полевой верификации: сбор наземных данных на ключевых участках для калибровки дистанционных показателей.

Аналитический этап:

- дескриптивный анализ -расчёт производных карт и индексов в ГИС;
- статистический анализ - выявление количественных связей;
- классификация - автоматизированное выделение структур.

Этап синтеза и интерпретации: сопоставление всех результатов, построение иерархической модели, разработка прикладных оценок (уязвимости).

Этап визуализации и презентации: создание статических карт и интерактивных веб-приложений.

4.2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ХОДЕ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЗАДАЧА 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИИ ЛАНДШАФТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Современные концепции ландшафтной организации горных территорий

Горные территории представляют собой классический пример сложно организованных геосистем, характеризующихся высокой пространственной дифференциацией и динамичностью. Их ландшафтная организация – результат многовекового взаимодействия мощных геолого-геоморфологических процессов и высотных климатических систем и др. Современные концепции ландшафтной организации горных систем отошли от упрощенного представления о горах как лишь о «ярусах» и перешли к системному взгляду, рассматривающему горы *как многомерные, иерархические и динамически связанные структуры.*

Рельеф в горных территориях выступает не просто как фон, а как *активный системообразующий фактор*, определяющий пространственную организацию и функционирование ландшафтов. Современные концепции рассматривают рельеф через диалектическое единство *факторов* (процессов формирования) и *условий* (сложившихся морфологических характеристик).

Рассмотрим основные *концепции ландшафтной организации горных территорий в зависимости от условий и факторов рельефа.* В данной случае под концепциями понимаем систему взглядов, основополагающую идею, которая определяет способ понимания, интерпретацию и изучение какого-либо сложного явления. Исследователь рассматривает объект своего изучения через определенную концепцию или их систему.

Концепция высотной поясности (вертикальной зональности). Отдельные представления заложены Геродотом и Александром фон Гумбольдтом (ввел понятие «орографические формы растительности»). Развитие концепции (XIX - начало XX века) произошло благодаря исследованиям П.П. Семёнов-Тян-Шанского; В.В. Докучаева (создал учение о широтной и вертикальной зональности как всеобщем законе природы); Карла Тролля (ввел термин «экология высокогорных ландшафтов», заложил основы современного ландшафтоведения горных стран); А.Г. Исаченка (разработал типологию структур высотной поясности); В.Б. Сочавы (высотные пояса рассматривал как иерархические геосистемы, связанные потоками вещества и энергии); Ф.Н. Милькова (представления о высотной ландшафтной поясности, рассматривая ее как проявление общего закона зональности); К.К. Марков развивал учение о «*географических уровнях*»

(геомерах), рассматривая рельеф как одну из важнейших планетарных причин дифференциации географической оболочки, включая формирование высотной поясности.

Высотная поясность - это фундаментальная, но эволюционировавшая концепция. В настоящее время классическое понимание высотной поясности, как последовательной смены природных зон от подножия к вершине, аналогично широтной зональности, сменяется исследованием новых закономерностей в ее организации. Возникают представления о *асимметрии горных склонов, барьерных эффектах, позиционных эффектах, «ландшафтном лифте» и др.*

Асимметрия горных склонов (вторая половина XX в.), отражает тот факт, что спектры поясности на наветренных и подветренных склонах, а также на склонах разной экспозиции (северной, южной) могут кардинально различаться. В своих работах по ландшафтоведению и типологии высотной поясности А.Г. Исаченко дал наиболее полное и систематическое описание асимметрии. Он выделил два основных типа асимметрии: *макросклоновая (межсклоновая)* асимметрия (обусловлена ориентацией склонов по отношению к господствующим влажным воздушным массам) и экспозиционную асимметрию - различия между склонами северной и южной экспозиции (*инсоляционная асимметрия*) в пределах одного хребта или долины (на южных склонах границы поясов смещены вверх и часто отличаются ксерофитизацией). В.Б. Сочава рассматривал асимметрию как системное свойство горных геосистем, возникающее из-за диссимметрии внешних энергетических воздействий (прежде всего, солнечной радиации и циркуляции атмосферы).

В дальнейшем происходила детализация механизмов асимметрии: К.Г. Раман изучал, как форма склона (выпуклый, вогнутый, прямой) и его экспозиция создают специфические микроклиматические условия («топоклиматы»), которые являются непосредственной причиной ландшафтной асимметрии. В современной геоморфологии изучается асимметрия в распределении современных рельефообразующих процессов: на наветренных склонах интенсивнее протекает водная эрозия; на подветренных - физическое выветривание и дефляция; на затененных (северных) склонах больше развиты процессы, характерные для северных территорий; на солнечных (южных) склонах преобладают осыпные и обвальные процессы.

Региональными исследованиями механизмов асимметрии склонов занимались: Д.А. Тимофеев, А.М. Олейник (Урал); В.С. Ревякин, А.Н. Рудой и др. (Алтай, Саяны); Н.А. Гвоздецкий, В.П. Чичагов, А.В. Шнитников, Л.Г. Польшова, Б.А. Вахрушев (Кавказ); Горный Крым изучали геоморфологи - Б.А. Вахрушев, А.А. Пасынков, Ю.Я. Благодаров, В.А. Суханов и ландшафтоведы – Г.Е. Гришанков, П.Д. Подгородецкий, В.Г. Ена и др.

Барьерный эффект - это способность горных систем выступать в качестве мощного климатического, геохимического и биологического разделителя, формирующего контрастные ландшафтные структуры на своих наветренных и подветренных макросклонах. Эту проблему изучали: А.Г. Исаченко, В.Б. Сочава, Н.А. Гвоздецкий, В.П. Чичаговым (Большой Кавказ), А. М. Олейник, Д.А. Тимофеев (Урал), а А.В. Хропов и С.В. Онуфреня осуществляли ГИС-анализ барьерных эффектов.

Концепции ландшафтных барьеров и экотонов и их количественное моделирование в условиях изменяющегося климата разработал Э.Г. Коломыц, рассматривая барьеры как фундаментальные структурные элементы географической оболочки, которые регулируют потоки вещества, энергии и информации. Он выделил *диссипативные барьеры* (которые не просто отражают или останавливают потоки, а трансформируют их, рассеивая (диссипируя) энергию) и *барьерно-экотонную организацию* ландшафтов, он доказал, что барьеры и связанные с ними экотоны (переходные зоны) являются каркасом, определяющим всю пространственную структуру ландшафтов.

«*Ландшафтный лифт*», как современная и очень наглядная метафора, описывает процесс изменения положения высотных ландшафтных в горах поясов (как правило, в верх по склонам) под воздействием глобального изменения климата.

В рамках концепции высотной поясности *рельеф выступает как условие* при рассмотрении: абсолютных высот - определяют температурный градиент; орографических барьеров - влияют на распределение осадков; мезоформ рельефа - создают модификации высотных поясов.

Рельеф как фактор нацеливает на изучение миграции границ поясов в результате современных геоморфологических процессов; формировании инверсионных поясов в условиях температурных инверсий; локальных нарушений поясности связанных с особенностями рельефа.

Концепция бассейновой организации и катенарных (позиционных) цепных связей смещает фокус с вертикали на горизонтальные и склоновые связи. Основоположники: А.Г. Исаченко [1], В.Б. Сочава [2], В.Г. Глушков [3] (развивал идею комплексного изучения речных бассейнов); М.И. Львович [4] (создатель учения о водном балансе и антропогенных изменениях водного баланса); М.С. Григорян и научная школа «Комплексного использования и охраны водных ресурсов»; К.Н. Дьяконов [5] (развивает ландшафтно-гидрологическое направление).

Бассейн реки рассматривается как элементарная единица организации вещества и энергии в горах и организации ландшафтов. В бассейновой организации акцентируется внимание на процессы: перераспределение твердого материала (процессы денудации, осыпи, оползни, сели); миграция влаги (поверхностный и подземный сток, питание рек); катенарные (цепные) связи (пространственная взаимосвязь ландшафтов от водораздела к подножию склона и руслу реки). Изменение одного звена катены (например, вырубка леса на склоне) неизбежно затрагивает все нижележащие звенья (усиление эрозии, заиливание русла).

Бассейновый подход к природопользованию стал мировым стандартом во многом благодаря: Европейской Рамочной Водной Директиве (EU Water Framework Directive, 2000 г.), которая законодательно закрепила управление по речным бассейновым округам; деятельности Международной ассоциации гидрологических наук (IAHS) и других организаций, продвигающих принципы Integrated Water Resources Management (IWRM).

Концепция бассейновой организации ландшафтов рассматривает рельеф *как условие* при изучении: морфологии водосборных бассейнов - определяет гидрологический режим; уклонов и профилей склонов - регулируют скорость стока и миграции веществ; орографической сети - создает структурный каркас ландшафтов.

Рельеф как фактор акцентирует внимание на функциях: дренирующей - перераспределение влаги; **транспортной** - перенос твердого материала; аккумулятивной - формирование конусов выноса, шлейфов и др.

Катенную структуру ландшафтной организации или позиционно-динамическую, обусловленную рельефом, изучали Б. Б. Польшов, М.А. Глазовская (разработали учение о геохимических ландшафтах и элювиально-транзитно-аккумулятивных рядах, выделяя элювиальные, трансэлювиальные, аккумулятивные и др. ландшафты). Данные идеи стали прообразом выделения *ландшафтных катен* (В.А. Николаев) и разработки *карт позиционно-динамической структуры* ландшафта (Г.И. Швобс, М.Д. Гродзинкий и др.). Позиционно-динамическая организация ландшафта – это пространственно-временная структура, в которой местоположение (позиция) ландшафтных контуров обусловлена их местоположением от водораздела, вниз по склону и до местного базиса эрозии. Это определяет состояние, функционирование и динамику ландшафтов за счет латеральных (боковых) связей.

Несколько расширенную трактовку позиции ландшафта обосновывает Е.А. Позаченюк [6]. Географическая позиция ландшафта рассматривается как *функционально-динамическая категория*, определяющая роль положения геосистемы (геосистем) в общеландшафтных процессах обмена. Позиция обуславливает свойства ландшафта не только через систему непосредственных сопряженных связей, но и посредством *пространственно-временных отношений*. Согласно представлению вышеупомянутого автора, позиция определяется не просто местом в рельефе, а местом в системе вещественно-энергетических связей ландшафта разного масштаба. Концепция географической позиции позволяет объяснить региональные особенности геокомплексов через их пространственно-временные отношения с другими объектами. На примере Крыма показано, как разные типы позиций формируют ландшафтное разнообразие и влияют на природные и антропогенные процессы.

Концепция мозаично-блочной структуры и литогенной основы ландшафта акцентирует внимание на роли рельефа и геологического строения. Горный ландшафт – это не плавный континуум, а сложная мозаика, сформированная на тектонических блоках и определенная: литологией горных пород; морфометрией рельефа (крутизна, экспозиция, расчлененность - определяют микроклимат, инсоляцию, сток и, как следствие, почвенно-растительный покров); экспозицией склонов (контраст между инсолируемыми (южными) и затененными (северными) склонами часто более выражен, чем разница между высотными поясами).

В рамках *мозаично-блочной структуры концепции рельеф как условие* выступает при изучении: высотной позиции - определяет температурный режим и увлажнение; экспозиции склонов - создает контрастность инсоляции и увлажнения; крутизны склонов - влияет на сток, эрозию и устойчивость почвенного покрова; формы мезорельефа - водоразделы, карры, долины формируют локальные экотопы. *Рельеф как фактор* рассматривается при изучении процессов: гравитационных - обвалы, осыпи, лавины; склоновых - плоскостной смыв, линейная эрозия и др.

При рассмотрении *литогенно-обусловленной мозаичности рельефа как условие* отражает: литологическую неоднородность - различные породы формируют контрастные геомы; тектонические структуры - блоки, разломы -определяют макроструктуру; поверхности выравнивания - реликтовые формы рельефа.

Рельеф как фактор: денудационные процессы - разрушение и преобразование горных пород; селевые процессы - формирование специфических ландшафтных комплексов; карстовые процессы - создание уникальных геосистем.

Концепция динамической устойчивости и уязвимости (чувствительности) ландшафтов особенно актуальная в свете антропогенного пресса и изменения климата. Горные геосистемы находятся в состоянии динамического равновесия между процессами денудации и устойчивости. Они обладают: устойчивостью - способностью сохранять структуру при внешних воздействиях; уязвимостью (чувствительностью) - низким порогом сопротивления нарушениям (незначительное вмешательство может вывести систему из равновесия, запустив цепь необратимых, как правило, негативных процессов); экологической емкостью - предельно допустимой антропогенной нагрузкой.

Концепция динамической устойчивости горных ландшафтов рассматривает *рельеф как условие*: экологический потенциал - определяемый устойчивостью склонов; буферная емкость - способность поглощать антропогенные воздействия; компенсационные механизмы - связанные с морфологией рельефа.

Рельеф как фактор: склоновая динамика - определяет скорость восстановления геосистем; катенарные связи - обеспечивают перераспределение вещества и энергии; пороговые эффекты - при достижении критических значений крутизны.

Ландшафтно-экологический подход интегративная концепция, синтезирующая все предыдущие. Заключается в рассмотрении горных ландшафтов как целостных систем «горные породы и рельеф - поверхностные и подземные воды – нижние слои атмосферы и климат – биота - человек».

Современные концепции ландшафтной организации горных территорий характеризуются в зависимости от рельефа переходом от *статического описания к динамическому анализу*, от *одномерной (вертикальной) модели к трехмерной (объемной)*, и от рассмотрения изолированных компонентов к изучению *их тесных функциональных связей*.

Наиболее перспективным является *интегративный подход*, который объединяет: классическую высотную поясность как макро-каркас; бассейновый и катенарный анализ как механизм функционирования; мозаично-блочную модель как основу пространственной дифференциации; оценку уязвимости и экосистемных услуг для целей устойчивого природопользования и адаптации к изменению климата. Такой синтез позволяет не только глубоко понять структуру и генезис горных ландшафтов, но и разрабатывать эффективные стратегии их охраны и рационального использования.

Таким образом, современные концепции ландшафтной организации горных территорий в зависимости от рельефа изменяются от статики к динамике - переход от описания рельефа как условия к анализу рельефных процессов как факторов; от вертикали к объемности - учет трехмерной организации горного пространства; от изолированности к

связанности - изучение рельефа в системе катенарных и бассейновых связей; от описания к прогнозу - моделирование развития ландшафтов на основе рельефных параметров. Современный анализ ландшафтной организации горных территорий требует комплексного подхода, учитывающего рельеф одновременно как: условие формирования ландшафтной структуры; фактор динамики и функционирования геосистем; результат длительного развития природных комплексов. Такой подход позволяет не только понять современную организацию горных ландшафтов, но и прогнозировать их развитие в условиях меняющихся природных и антропогенных воздействий.

Пространственно-временные уровни организации ландшафтов Горного Крыма

Геоморфологические условия (рельеф) являются одним из главных факторов дифференциации ландшафтов. В Горном Крыму рельеф определяет вертикальную зональность, экспозиционные различия и др. Пространственно-временные уровни позволяют рассматривать ландшафтную структуру в иерархии от общего к частному.

В работе рассматривали три пространственно-временных уровня: макрорегиональный; мезорегиональный; локальный. Предложенная структура анализа является классическим примером иерархического подхода в ландшафтоведении, который позволяет системно и на разных уровнях детализации раскрыть роль рельефа как главного каркасообразующего фактора организации ландшафтов Горного Крыма.

При этом рассматриваем *геоморфологические условия* как статическую составляющую (высота, крутизна, экспозиция, расчлененность рельефа) создающую пространственный каркас ландшафта. *Геоморфологические факторы* (динамическая составляющая: склоновые процессы, эрозия, аккумуляция) определяют механизмы перераспределения вещества и энергии, формируя и поддерживая этот каркас. Их взаимодействие на разных уровнях создает ту сложную пространственную организацию, которую мы наблюдаем.

Обоснование по уровням

Макрорегиональный уровень (весь Горный Крым и его самая общая структура - ландшафтные зоны и пояса). На этом уровне рельеф выступает как главный фактор дифференциации макроклиматов и, как следствие, формирования высотной зональности (поясности). Рельеф является деления всего Горного Крыма на крупные ландшафтные структуры (ландшафтные уровни, пояса, зоны) через механизм высотной климатической дифференциации и барьерного эффекта.

Мезорегиональный уровень (структура зон и поясов, включая позиционные ряды, группы закрытых и открытых склонов). Рельеф организует латеральные связи и перераспределяет ресурсы тепла и влаги внутри зон и поясов, создавая мозаику ландшафтных местностей и урочищ и фаций, связанных потоками вещества. На этом уровне рельеф (склоны) организует вещественно-энергетические потоки и создает позиционную дифференциацию внутри каждого пояса.

Локальный уровень (микрзоны, крутизна, экспозиция склонов и др.)

На этом уровне геоморфологические факторы создают конкретные местообитания (фации) с уникальным экологическим режимом. Крутизна склона: определяет интенсивность склоновых процессов. Рельеф создает мозаику экологических условий на уровне конкретных местообитаний, определяя состав растительности, свойства почв и микроклимат, то есть формирует элементарные ячейки ландшафта - фации.

Предложенная трехуровневая схема не просто дробит территорию, а показывает иерархическую вложенность систем: макроуровень задает общий энергетический и гидротермический фон; мезоуровень перераспределяет ресурсы этого фона, создавая структурные единицы ландшафта; локальный уровень формирует окончательную, в т.ч. элементарную дифференциацию местность, урочищ, фации.

Таким образом, геоморфологические условия и факторы являются сквозным, системообразующим элементом на всех трех пространственно-временных уровнях организации ландшафтов Горного Крыма, определяя их структуру, динамику и функционирование от макромасштаба до конкретного местообитания.

ЗАДАЧА 2. МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ ЛАНДШАФТОВ ГОРНОГО КРЫМА НА МАКРОРЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ

Модель организации ландшафтов Горного Крыма базировалась на работах, отражающих как компонентную структуру ландшафта – Мерченко А.К. [7], Муратов М.В. [8], Вахрушев Б.А. [9], Вахрушева Л.П. [10, 11], Важов В.И. [12], Драган Н.А. [13], Вульф Е.В. [14], Львова Е.В. [15], и др., а комплексную Гришанов Г.Е. [16, 17, 18], Ена В.Г. [19], Позаченюк Е.А. [20, 21], Подгородецкий П.Д. [22] и др.

Модель организации ландшафтов Горного Крыма представляет собой трехуровневую иерархическую систему: ландшафтный уровень → зона → пояс. Она отражает главную закономерность природы Горного Крыма — вертикальную зональность (поясность), которая существенно различается на северном и южном макросклонах из-за разницы в увлажнении и инсоляции.

Общая структура модели:

- низкогорный ландшафтный уровень (примерно до 350-400 м н.у.м.);
- среднегорный ландшафтный уровень (примерно от 400 до 1000 м н.у.м.);
- низкогорный ландшафтный уровень (для Южного берега Крыма, особый тип низкогорий (0-400 м н.у.м.).

Ландшафтные уровни - это планетарные геоморфологические образования, относительно однородные по характеру рельефа и грунтового увлажнения, но отличающиеся своеобразием проявления географической зональности [23]. В основе их выделения лежит гипсометрический принцип. Ландшафтные зоны – подразделения внутри уровней, выделяемые по зональным особенностям климата, растительности и по макропозиции (орографический принцип); ландшафтные пояса – высотно-зональные

подразделения внутри зон, характеризующиеся специфическим сочетанием растительных ассоциаций и типов местности (рисунок 2.1).

Низкогорный ландшафтный уровень северного макросклона Крымских гор *представлен зоной предгорных аккумулятивных, останцово-денудационных и структурных денудационных равнин и куэстовых возвышенностей с разнотравными степями, кустарниковыми зарослями, лесостепью и низкорослыми дубовыми лесами.*

Низкогорный ландшафтный уровень – это переходная зона между равнинными степями и горными лесами Крыма. Характеризуется сложным сочетанием геоморфологических структур - от аккумулятивных равнин до куэстовых гряд. Отличается мозаичностью растительного покрова, где степные сообщества сменяются лесостепными комплексами и низкорослыми дубовыми лесами [17], [23]. Почвенный покров представлен чернозёмами предгорными, коричневыми и бурыми горно-лесными почвами.

Горные ландшафты характеризуются высотной поясностью. Низкогорный ландшафтный уровень включает 3 ландшафтных пояса (таблица 2.1). Первый пояс существенно преобразован антропогенной деятельностью и в настоящее время представлен степными сообществами на аккумулятивных и денудационных равнинах

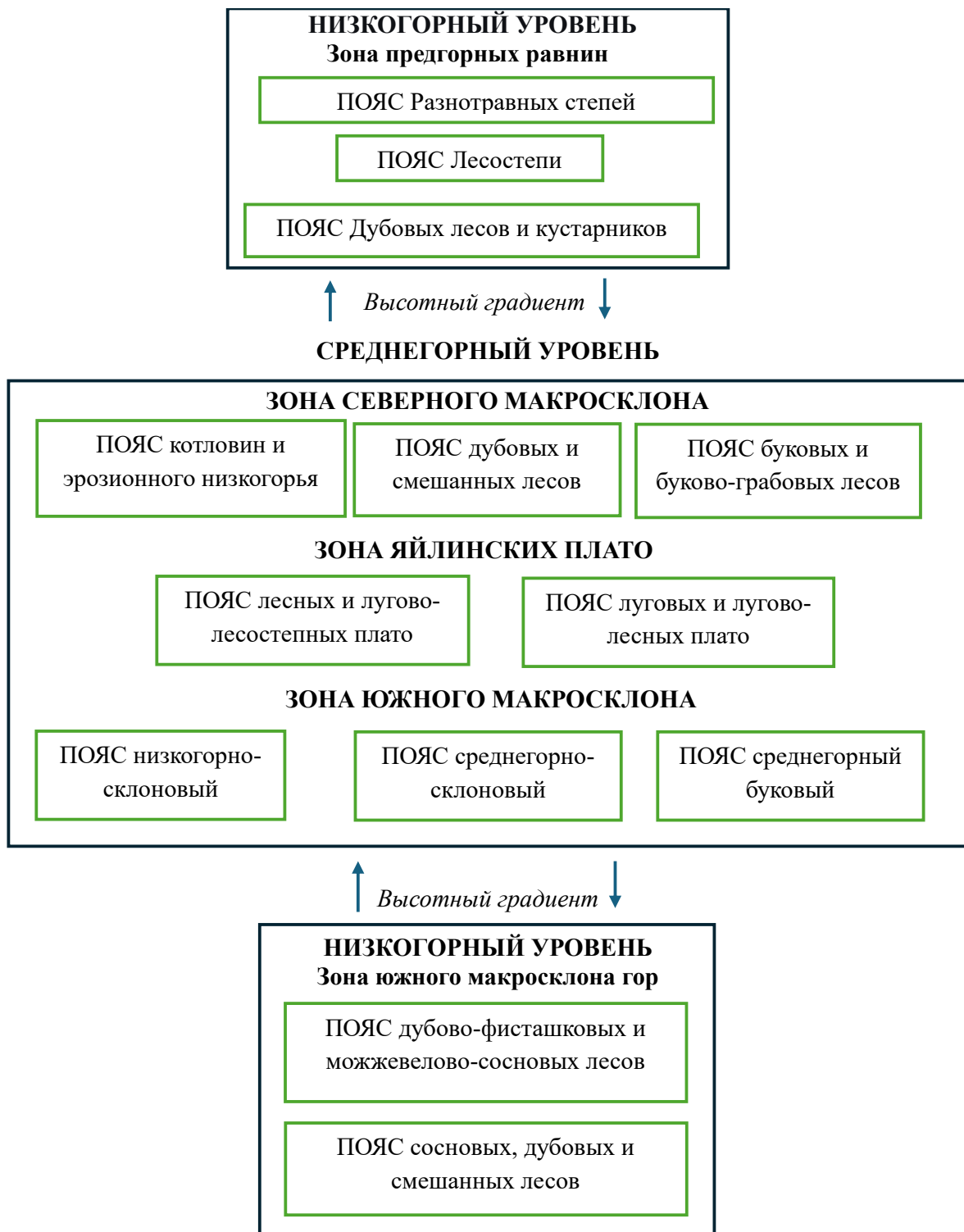


Рисунок 2.1 - Схема модели организации ландшафтов Горного Крыма на макрорегиональном уровне.

Таблица 2.1 - Ландшафтная структура низкогорного ландшафтного уровня (с использованием данных [24, с дополнениями автора])

Ландшафтная зона	Ландшафтные пояса	Краткая характеристика пояса
Зона предгорных равнин и куэст (Северный склон)	Пояс бородачево-разнотравных степей (5 видов местностей)	Аккумулятивные и денудационные равнины. Сухие степи на выположенных участках.
	Пояс лесостепи (11 видов местностей)	Останцово-денудационные и куэстовые возвышенности. Мозаика степных участков и лесных массивов/кустарников.
	Пояс дубовых лесов и кустарников (5 видов местностей)	Наклонные равнины и куэсты. Преобладание низкорослых дубрав (преимущественно дуба пушистого) и шибляка.
Зона южного макросклона (Южный склон, субсредиземноморская)	Низкогорный пояс дубово-фисташковых лесов и шибляка (13 видов местностей)	Самый теплый и сухой лесной пояс Крыма. Разреженные светлые леса с вечнозеленым подлеском, переход к шибляковым зарослям.
	Низкогорный пояс сосновых и дубовых лесов (9 видов местностей)	Более увлажненные склоны. Пояс формирования сомкнутых лесных сообществ (сосна крымская, дуб скальный).

Пояс бородачево-разнотравных и асфоделиново-разнотравных степей на аккумулятивных и денудационных равнинах в пределах высот 150-300 м над уровнем моря.

Экологические условия - умеренное увлажнение, хорошая дренированность, почвы средней мощности, характеризуется преобладанием богаторазнотравных степей с доминированием бородача (*Bothriochloa*) и асфоделины (*Asphodeline*). Отличается высоким видовым разнообразием травянистых растений. Геоморфологическая основа - сглаженные равнины различного генезиса. Включает 5 видов местностей.

Пояс лесостепи на останцово-денудационных, структурных денудационных и аккумулятивных равнинах, куэстовых возвышенностях простирается на высотах 250-450 м над уровнем моря. Экологические условия: повышенное увлажнение, мозаичность экологических условий, контрастность микроклимата, с представляет собой сложную мозаику степных и лесных ландшафтов. Чередование открытых степных пространств с зарослями кустарников и отдельными лесными массивами. Характерно максимальное ландшафтное разнообразие, включает 11 видов местностей.

Пояс дубовых лесов и кустарниковых зарослей на останцово-денудационных и наклонных структурных денудационных равнинах и куэстовых возвышенностях

(высота: 350-600 м над уровнем моря). Экологические условия: достаточное увлажнение, преобладание процессов денудации, маломощные почвы. Пояс характеризуется преобладанием лесной растительности - низкорослых дубовых лесов (*Quercus pubescens*, *Q. petraea*) с участием граба, ясеня. На крутых склонах и участках с маломощными почвами развиты шибляковые кустарниковые формации. Включает 5 видов местностей.

Экологическая значимость: низкогорный ландшафтный уровень обладает высокой биологической и ландшафтной ценностью. Здесь сохранились уникальные лесостепные комплексы, являющиеся рефугиумами биоразнообразия. Куэстовые ландшафты выполняют важную водоохранную и почвозащитную функцию. Данный ландшафтный уровень требует особого внимания при организации охраны природы и рационального природопользования.

Низкогорный ландшафтный уровень южного макросклона Крымских гор представляет собой уникальную природную систему, характеризующуюся переходом от средиземноморских к умеренным лесным экосистемам. Отличается сложным рельефом с преобладанием крутых склонов южной экспозиции, интенсивными процессами денудации и высокой сейсмической активностью. Почвенный покров мозаичный, представлен коричневыми, бурыми горно-лесными и щебнистыми скелетными почвами. Климатические условия характеризуются мягкой зимой, жарким летом и максимальным для Крыма количеством солнечной радиации [13], [25].

Низкогорный ландшафтный уровень южного макросклона Крымских гор представлен одной зоной и двумя поясами (таблица 2.1).

Зона южного макросклона гор, полусубтропических дубовых, фисташково-дубовых, можжевельново-сосновых лесов и шибляковых зарослей.

Низкогорный пояс дубово-фисташковых, можжевельново-сосновых лесов и шибляковых зарослей расположен в пределах высот от уровня моря до 300-400 м над уровнем моря. Экологические условия: высокая инсоляция, умеренное увлажнение, интенсивное развитие физико-географических процессов, включая оползневые, эрозионные, абразионные и сейсмические. Пояс отличается преобладанием ксерофитных лесных формаций и шибляковых зарослей с выраженными средиземноморскими чертами. Наиболее ценные – можжевельново-сосновые и дубово-фисташковые леса. Ландшафтное разнообразие высокое – 13 видов местностей.

Низкогорный пояс сосновых, дубовых и смешанных широколиственных лесов и шибляковых зарослей (высота: 350-700 м над уровнем моря). Экологические условия: умеренно-теплый климат, достаточное увлажнение, снижение интенсивности негативных процессов. Пояс характеризуется увеличением доли мезофильных лесных сообществ при сохранении элементов средиземноморской флоры. Отмечается увеличение видового разнообразия и продуктивности лесных экосистем. Ландшафтное разнообразие включает 9 видов местностей.

Среднегорный ландшафтный уровень имеет сложную структуру (таблица 2.2).

Он представляет собой центральную и наиболее возвышенную часть Крымских гор. Для него характерна значительная расчлененность рельефа, вертикальная зональность климата и почвенно-растительного покрова, а также сложная мозаика ландшафтов,

сформированная взаимодействием геологических структур, климатических условий и высотной поясности.

Таблица 2.2 - Среднегорный ландшафтный уровень Горного Крыма с использованием данных [24, с дополнениями автора]

Ландшафтная Зона	Ландшафтные Пояса	Краткая характеристика пояса
Зона северного макросклона (Умеренно-континентальный спектр)	1.Пояс котловин и эрозионного низкогорья (10 видов местностей)	Котловинообразные понижения и долины. Ландшафты лугов, лесов и опушек. Влагонакопление.
	2.Среднегорно-склоновый пояс дубовых и смешанных лесов (6 видов местностей)	Склоны средней крутизны. Господство дуба скального, граба, примесь сосны обыкновенной.
	3.Среднегорно-склоновый пояс буковых лесов (4 вида местностей)	Верхняя часть лесного пояса. Тенистые, влажные монодоминантные бучины.
Зона яйлинских плато (Вершинный уровень)	1.Пояс лесных и лугово-лесостепных плато (5 видов местностей)	Переходный пояс от леса к яйле. Карстовые поля, чередующиеся с лесными массивами.
	2.Пояс луговых и лугово-лесных плато (4 вида местностей)	Собственно яйлы. Господство остепненных лугов и горных степей на карстовых плато.
Зона южного макросклона (Субсредиземноморский спектр)	1.Среднегорный пояс буковых лесов (4 вида местностей)	Верхняя граница леса на южном склоне. Более сухие и разреженные буковые леса по сравнению с северным склоном.
	2.Среднегорно-склоновый пояс сосновых и дубовых лесов (7 видов местностей)	Основной лесопокровный пояс ЮБК. Сосна обыкновенная и крымская, дуб скальный.
	3.Низкогорно-склоновый пояс дубовых лесов (6 видов местностей)	Крутые склоны, обращенные к морю. Разреженные дубравы с богатым подлеском.

Уровень охватывает три основные зоны, каждая из которых включает несколько поясных подразделений.

Зона северного макросклона гор, буковых, дубовых и смешанных широколиственных лесов характеризуется среднекрутыми склонами, обращенными к внутренней части Крымского полуострова. Здесь формируется более прохладный и влажный климат по сравнению с предгорьями, что создает оптимальные условия для развития мощных лесных ландшафтов. Включает три ландшафтных пояса.

Пояс котловин и эрозионного низкогорья, дубовых, смешанных широколиственных и сосновых лесов. Это нижняя часть среднегорья (около 400-600 м над уровнем моря.). Рельеф представлен сочетанием относительно выровненных межгорных котловин и расчлененного эрозионного низкогорья с густой овражно-балочной сетью. Господствуют светлые дубовые леса (скальный и пушистый дуб), часто с участием граба, ясеня и клена. На хорошо прогреваемых склонах распространены сосновые леса (сосна крымская и обыкновенная). В составе присутствуют шибляковые формации. Ландшафтное разнообразие высокое (10 видов местностей) и обусловлено сложным сочетанием форм рельефа (склоны различной экспозиции и крутизны, днища котловин), разнообразием почвенного покрова (буроземы, дерново-карбонатные почвы) и мозаичностью растительных сообществ.

Пояс среднегорно-склоновый, дубовых, можжевельново-дубовых и смешанных широколиственных лесов простирается в средней части макросклона (примерно 600-800 м).

Характерны умеренно крутые и крутые склоны с активными склоновыми процессами. Преобладают смешанные широколиственные леса с господством дуба и граба. Характерной особенностью является участие реликтового можжевельника в подлеске или в качестве содоминанта, что указывает на ксерофитизацию некоторых участков. Появляются первые примеси бука. Ландшафтное разнообразие - среднее (6 видов местностей), определяется в основном экспозицией склонов (северные — более влажные, южные — более сухие), литологией коренных пород и связанными с ними типами растительности.

Пояс среднегорно-склоновый, буковых, буково-грабовых, смешанных широколиственных лесов расположен в пределах высотного диапазона: верхняя часть склонов северного макросклона (около 800-1000 м). Крутые склоны, часто переходящие в обрывистые уступы под яйлами.

Бук восточный становится доминирующей породой, формируя тенистые высокоствольные леса. Широко распространены буково-грабовые ассоциации. Это наиболее влажный пояс зоны, что способствует развитию мощной лесной подстилки и богатого травяного покрова. Ландшафтное разнообразие относительно низкое (4 вида местностей). Ландшафты более однородны с доминированием буковых лесов. Различия определяются геоморфологическими особенностями (гребни, крутые склоны, ложбины).

Зона яйлинских плато, горных лугов и горной лесостепи представляет собой уникальный ландшафтный уровень вершинных поверхностей Главной гряды Крымских гор (яйлы). Для нее характерны карстовые формы рельефа, холодный влажный климат и господство луговой и лесостепной растительности. Зона состоит из 2-х ландшафтных поясов.

Пояс лесных и лугово-лесостепных плато имеет высотный диапазон нижних уступов яйлинских плато около 1000-1200 м н.у.м. Рельеф представлен волнистыми поверхностями плато с карстовыми воронками, котловинами и останцами. Растительность - сочетание лесных массивов и луговых степей. Леса (бук, граб, реже сосна) занимают понижения, карстовые воронки и более увлажненные участки, а открытые пространства покрыты богаторазнотравными луговыми степями. Это пояс горной лесостепи.

Ландшафтное разнообразие высокое (5 видов местностей), обусловлено чередованием лесных и луговых участков, интенсивностью карстовых процессов и микроклиматическими контрастами.

Пояс луговых и лугово-лесных плато с высотными диапазонами наиболее высоких центральных части яйл свыше 1200 м н.у.м. Рельеф – структурное, сильно закарстованные плато. Господствует горно-луговая растительность. Луга (остепненные, разнотравно-злаковые) занимают обширные пространства. Лесная растительность сохраняется лишь фрагментарно в наиболее защищенных местах, образуя редкие низкорослые группировки (бук, граб, сосна). Ландшафтное разнообразие среднее (4 видов местностей). Различия связаны с типами луговых сообществ, глубиной залегания карстовых полостей и степенью облесенности.

Зона южного макросклона гор, дубовых, сосновых и смешанных широколиственных лесов. Южный макросклон круто обрывается к Черному морю, что создает уникальные условия: более теплый и сухой климат, интенсивную инсоляцию и влияние морских воздушных масс. Это обуславливает совершенно иную структуру растительного покрова по сравнению с северным склоном.

Пояс низкогорно-склоновый дубовых и смешанных широколиственных лесов с высотными диапазонами нижней части южного склона около примерно 300-500 м н.у.м.

Рельеф характеризуется очень крутыми, часто обрывистыми склонами. Преобладают пушистодубовые и скальдубовые леса с участием фисташки, кизила, грабинника. Широко распространены шибляки. Сосновые леса (сосна крымская) занимают крутые склоны и обрывы. Ландшафтное разнообразие высокое (6 видов местностей). Определяется исключительной крутизной и расчлененностью рельефа, контрастной экспозицией, что создает пеструю мозаику ксерофитных и мезофитных сообществ.

Пояс среднегорно-склоновый, дубовых, сосновых и смешанных широколиственных лесов с высотными диапазонами средней части южного склона около 500-800 м н.у.м. Характеризуется крутыми склонами с интенсивным развитием негативных процессов, свойственны оползневые террасы. Растительность представлена сложной мозаикой из сосновых (преимущественно сосна крымская) и дубовых (скальный дуб) лесов с примесью граба, клена, липы. Наиболее ценными являются реликтовые сосновые редколесья. Ландшафтное разнообразие очень высокое (7 видов местностей). Максимальное для среднегорья. Объясняется сочетанием лесорастительных условий, литологического разнообразия (известняки, конгломераты, сланцы) и активных геоморфологических процессов (осыпи, оползни).

Пояс среднегорный буковых и смешанных широколиственных лесов. Верхняя часть южного макросклона имеет высоты под кромкой яйл около 800-1000 м н. у.м. Рельеф характеризуется крутыми, часто скалистыми, склонами. Появляются **буковые леса**, но они, преимущественно, имеют разреженный характер. Распространены смешанные буково-грабовые и грабовые леса. Ландшафтное разнообразие относительно низкое (4 видов местностей). Ландшафты более унифицированы, их разнообразие определяется в основном формами микрорельефа и степенью сохранности лесного покрова на крутых склонах.

Представленная структура ландшафтного уровня демонстрирует исключительное ландшафтное разнообразие крымского среднегорья, которое является результатом сложного взаимодействия высотной поясности, экспозиции склонов и геолого-геоморфологических особенностей. Наиболее высокое разнообразие местностей характерно для переходных и нижних поясов, где наблюдается максимальный экотип

(градиент условий), в то время как верхние пояса и яйлы отличаются большей однородностью.

Представленная модель отличается главными описанными ниже закономерностями:

- асимметрия склонов - модель чётко разделяет ландшафты *северного* (более континентальный, лесостепной) и *южного* (приморский, средиземноморско-лесной) макросклонов;
- вертикальная поясность - в пределах каждого макросклона наблюдается ясная смена ландшафтов с высотой от ксерофитных степей и шибляков → через дубовые и сосновые леса → к буковым лесам → и, наконец, к безлесным яйлинским плато;
- уникальность ЮБК – южнобережные ландшафты выделены в отдельный низкогорный ландшафтный уровень, подчёркивая их исключительность и принадлежность к полусубтропическому региону;
- секторность - изменение структуры поясов в широтном направлении: западный сектор имеет более мягкие и влажные условия; восточный сектор характеризуется возрастанием континентальности и ксерофитизации;
- экспозиционная дифференциация особенно выражена на южном макросклоне, где каждый пояс имеет сложную внутреннюю структуру местностей.

Таким образом, ландшафтная структура Горного Крыма представляет собой классическую модель средиземноморской горной страны с выраженной асимметрией склонов, где высотная поясность осложнена секторными различиями и сложной орографией. Данная модель является наглядным инструментом для понимания пространственной организации и экологического разнообразия Горного Крыма.

ЗАДАЧА 3. МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ ЛАНДШАФТОВ ГОРНОГО КРЫМА НА МЕЗОРЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ

3.1. Позиционные ряды

Позиционно-динамическая структура (ПДС) – это одно из фундаментальных понятий в современном ландшафтоведении, которое позволяет понять не только строение, но и *функционирование* ландшафта. Это концепция, разработанная преимущественно советской и российской ландшафтной школой (Сочава В.Б [2], Ф.Н. Мильков [26], Арманд Д.Л. [27], К.Н. Дьяконов [5] и др.).

Суть концепции состоит в рассмотрении связей между ландшафтами потоками вещества и энергии и информации, т.е. как они взаимодействуют и влияют друг на друга.

Ключевая идея состоит в том, что свойства и состояние каждого ландшафта (например, урочища) зависят не только от его внутренних процессов, но и от его *позиции* (положения) в более крупной системе и от *динамических процессов* (перемещения воды, вещества, энергии), которые через него проходят.

Два основных компонента ПДС – ее топологическая и динамическая структура.

Позиционная структура (или топологическая) – это пространственное расположение элементарных геосистем (фаций, урочищ) относительно друг друга, которое обуславливает направление и интенсивность вещественно-энергетических потоков, а также как это положение влияет на взаимодействие. Пример: катенарная последовательность (катена) - это последовательность фаций, расположенных на склоне от его вершины к подножию. Каждая фация занимает свою уникальную позицию, которая определяет её функцию в общей системе:

- верхняя часть склона (водораздел) - элювиальная позиция (*El*). Здесь происходит смыв влаги и веществ. Положение определяет бедность влагой и питательными веществами (рисунок 3.1.1);
- средняя часть склона - трансэлювиальная/трансакумулятивная позиция (*Tr*). Здесь происходит транзит вещества, снесенного сверху;
- нижняя часть склона (подножие) - аккумулятивная позиция (*Ac*). Здесь накапливаются вода и вещества, принесенные с вышележащих позиций. Почвы здесь самые плодородные и увлажненные;
- дно долины/балки: субаквальная позиция (*S*). Здесь может находиться ручей или заболоченная территория, где аккумуляция максимальна.

Позиция также может быть аквальная (дно водоема) или супераквальная (прибрежная зона).

Динамическая структура (или функциональная) позиция - совокупность вещественно-энергетических потоков, связывающих отдельные фации и урочища в единое целое (рисунок 3.1.2). Эти потоки являются прямой функцией от позиционной структуры. Основные виды потоков (связей):

- a. Гравитационные: перемещение вещества под действием силы тяжести.
 - Склоновый сток: Движение воды и взвешенных в ней частиц почвы с верхних частей склона вниз.
 - Перемещение обломочного материала (осыпи, оползни).
- b. Ветровые (эоловые): перенос песка, пыли, снега, семян растений.
- c. Биогенные: перемещение животных, перенос pollen (пыльцы), семян, органических веществ.
- d. Антропогенные: самый мощный современный фактор. Вывоз урожая с полей (отток веществ), завоз удобрений (приток веществ), сброс сточных вод в реки, движение транспорта.



Рисунок 3.1.1 - Позиционно-динамическая структура ландшафта (катена)

Позиция	Тип позиции	Доминирующие процессы	Характеристики почв и растительности
Водораздельная поверхность	Элювиальная	Выветривание, вертикальный влагообмен, вынос веществ.	Почвы маломощные, сухие. Растительность ксерофитная (засухоустойчивая).
Верхняя часть склона	Трансэлювиальная	Активный смыв и перенос вещества.	Почвы скелетные, щебнистые. Растительность разреженная.
Средняя часть склона	Трансаккумулятивная	Относительное равновесие смыва и аккумуляции.	Почвы более развитые. Растительность типична для данной зоны.
Нижняя часть склона (подножье)	Аккумулятивно-супераквальная	Накопление вещества (делювий), дополнительное увлажнение.	Почвы мощные, плодородные, часто переувлажненные. Растительность гигрофитная (влаголюбивая).
Дно долины (пойма)	Аквально-аккумулятивная	Накопление аллювия, насыщение	Аллювиальные почвы, луговые или лесные сообщества с высоким уровнем грунтовых вод.

Модель сопряженного ряда (катены)



Вывод: Проходя по такому склону сверху вниз, мы наблюдаем не случайную смену природных условий, а **закономерную, предсказуемую последовательность**, обусловленную перераспределением вещества и энергии.

Рисунок 3.1.2 - Позиционно-динамическая структура как функциональная характеристика

Практическое значение и применение концепции позиционно-динамической структуры ландшафта (рисунок 3.1.3).

Понимание ПДС является основой для решения множества прикладных задач:

- a. Сельское и лесное хозяйство:
 - почвозащитное земледелие: зная направление потоков вещества, можно правильно расположить лесополосы и агротехнические приемы для борьбы с эрозией. Например, распахивать поля поперек склона, чтобы замедлить сток;
 - повышение урожайности: понимая, что в нижних аккумулятивных позициях естественно накапливаются питательные вещества и влага, можно более эффективно вносить удобрения, экономя ресурсы.
- b. Градостроительство и территориальное планирование:
 - правильное размещение населенных пунктов, промышленных зон и зон отдыха с учетом природных потоков. Не строить жилые дома в зонах аккумуляции загрязняющих веществ или в местах схода лавин;
 - планирование ливневой канализации с учетом естественных путей стока воды.
- c. Природоохранная деятельность и экологическая экспертиза:
 - оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС): Чтобы предсказать последствия строительства завода, нужно понять, в какой *позиции* он находится. Завод, построенный в элювиальной позиции (на водоразделе), будет загрязнять через воздух и воду огромную территорию ниже по склону. Завод в аккумулятивной позиции (в долине реки) будет в первую очередь отравлять сам себя и локальную зону.
 - локализация источников загрязнения: Если в реке обнаружено загрязнение, двигаясь *против* естественного потока воды (от аккумулятивной позиции к элювиальной), можно найти источник.
- d. Мелиорация и борьба с эрозией:
 - проектирование систем осушения или орошения с учетом естественной позиционно-динамической структуры ландшафта для достижения максимального эффекта.



Рисунок 3.1.3 - Практическое значение позиционно-динамической структуры ландшафта

Таким образом, позиционно-динамическая структура – это модель, которая рассматривает ландшафт не как статичную мозаику, а как непрерывно функционирующую систему, где все компоненты связаны потоками вещества и энергии. Это «кровеносная и нервная система» географического ландшафта, объясняющая, почему всё в природе взаимосвязано и почему воздействие на один элемент неизбежно отражается на других.

3.2. Группы закрытых и открытых склонов

Концепцию о ландшафтах закрытых, открытых, полузакрытых и полуоткрытых склонов выдвигал Г.Е. Гришанков [17]. Понятие «открытых и закрытых склонов» основано на количестве поступающей солнечной радиации, которое напрямую зависит от ориентации склона относительно сторон света и его крутизны и степени закрытости.

а. *Открытые (инсолируемые, солнечные) склоны:*

- ориентация: южные, юго-восточные и юго-западные экспозиции;
- суть: эти склоны в течение дня получают максимальное количество прямой солнечной радиации. Солнце освещает их большую часть дня, даже в зимний период;
- последствия: здесь формируется более тёплый и сухой микроклимат (почвы прогреваются сильнее и быстрее высыхают; испарение выше, а влажность почвы и воздуха ниже; растительность часто ксерофитная (засухоустойчивая), разреженная. Снежный покров зимой менее мощный и неустойчивый, быстрее сходит.

b. Закрытые (затенённые, холодные) склоны:

- ориентация: северные, северо-восточные и северо-западные экспозиции;
- суть: эти склоны получают минимум прямой солнечной радиации, находятся в тени большую часть дня, особенно в холодный сезон;
- последствия: здесь формируется прохладный и влажный микроклимат (почвы прогреваются слабее, дольше сохраняют влагу; испарение ниже, влажность выше; растительность более мезофитная (влаголюбивая), часто более густая и теневыносливая. Снежный покров лежит дольше.

Промежуточное положение занимают склоны восточной и западной экспозиции, которые могут проявлять свойства как открытых, так и закрытых в зависимости от сезона и времени суток.

Методические подходы. Для выделения открытых и закрытых склонов в пределах Горного Крыма использовался метод, основанный на расчёте коэффициента видимости небосвода Sky View Factor (SVF). SVF представляет собой безразмерную величину от 0 до 1, характеризующую долю небесной полусферы, видимой из данной точки рельефа. В точке, где $SVF = 0$, всё небо скрыто от глаз препятствиями, тогда как значения, близкие к 1, соответствуют открытым, незатенённым участкам [28].

В Горном Крыму с его сильно расчленённым рельефом, глубокими долинами и каньонами использование Sky View Factor для выделения открытых и закрытых склонов – это более точный метод по сравнению с простым анализом экспозиции. Он позволяет количественно оценить степень «открытости» каждого участка склона для небосвода, что напрямую коррелирует с формированием контрастных микроклиматических и, как следствие, почвенно-растительных условий, столь характерных для Крымских гор. Это ключ к пониманию пространственного распределения тепла, влаги и экологических ниш.

Исходной основой для расчёта послужила цифровая модель рельефа (ЦМР), полученная на основе съёмки SRTM с пространственным разрешением 30 м. Все расчёты выполнялись в программной среде SAGA GIS с использованием модуля Sky View Factor из набора инструментов Terrain Analysis.

При расчёте задавались следующие параметры: радиус поиска – 1000 м, шаг по азимуту – 15° , шаг по зенитному углу – 5° . Такой радиус был выбран с учётом характерных масштабов рельефа Горного Крыма и позволяет учитывать перекрытие не только ближайшими формами, но и более отдалёнными склонами.

Используя вышеописанный метод и применяемые параметры разработана карта фактора видимости неба Горного Крыма (SVF), представленная на рисунке 3.2.1.

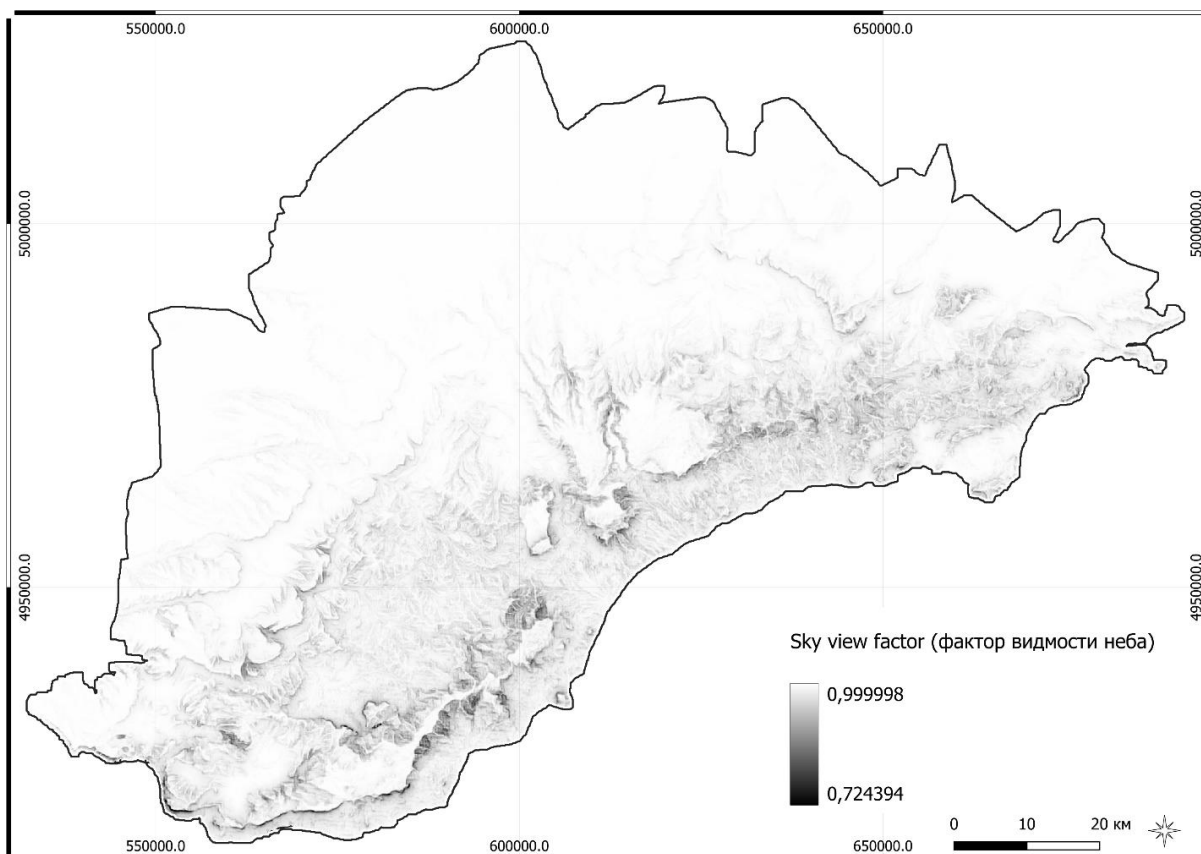


Рисунок 3.2.1 - Фактор видимости неба Горного Крыма (SVF)

Анализ полученного растра SVF показал, что в исследуемом регионе отсутствуют участки с классически «закрытыми» условиями ($SVF < 0,6$). Минимальное значение SVF составило 0,724, максимальное – 0,999. Для выделения четырёх градаций открытости склона была выполнена равномерная дискретизация, ранее указанного, диапазона (0,724; 0,99) на четыре интервала по формуле 1:

$$0,99 - 0,724 = 0,275; \quad \frac{0,275}{4} = 0,069 \quad (1)$$

Полученные пороговые значения использованы для переклассификации исходного растра, представленного на рисунке 3.2.1:

Класс 1 «закрытые»: SVF 0,724–0,793

Класс 2 «полузакрытые»: SVF 0,793–0,862

Класс 3 «полуоткрытые»: SVF 0,862–0,931

Класс 4 «открытые»: SVF 0,931–0,999

Следует подчеркнуть, что даже «закрытые» участки в данной классификации остаются относительно открытыми с точки зрения стандартов ($SVF > 0,7$), однако в

контексте локальной топографии Горного Крыма они представляют собой наиболее экранированные и затенённые участки рельефа.

В результате переклассификации исходного растра Sky view factor, получена карта групп склонов по степени открытости (закрытые, полузакрытые, полукоткрытые, открытые), представленная на рисунке 3.2.2.

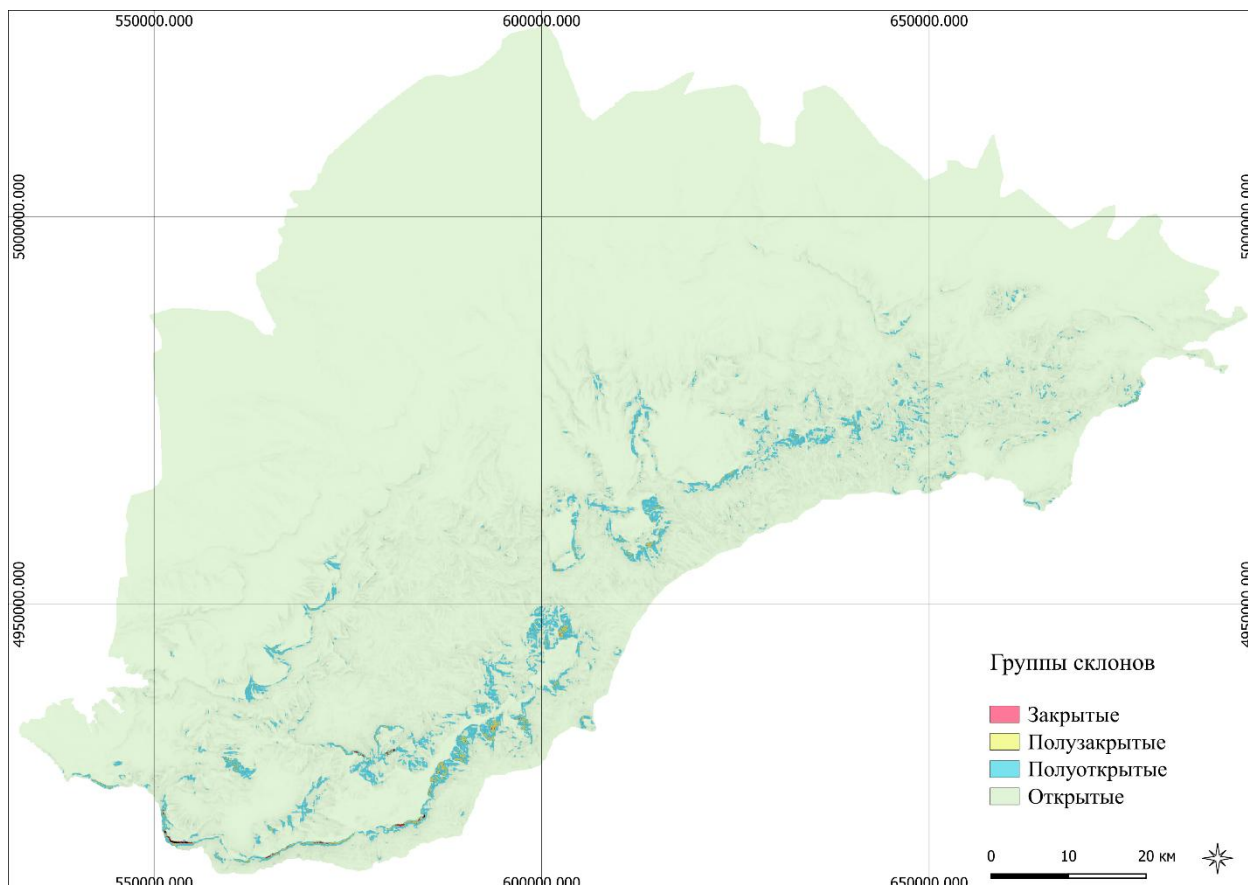


Рис. 3.2.2 - Группы склонов по степени открытости, на основе фактора видимости неба

Анализ карты фактора видимости неба (Sky View Factor – SVF) Горного Крыма, позволил выявить четкую закономерность в пространственном распределении склонов по степени их «закрытости». Наблюдается явное преобладание открытых ландшафтных позиций, что обусловлено геоморфологической структурой региона – преимущественно широкими, пологими или склонами средней крутизны, характерными для водораздельных плато и вершинных частей хребтов.

Наиболее распространенным типом являются **открытые склоны**. Они приурочены к вершинным частям горных хребтов, междуречьям и внешним склонам долин, где наблюдается максимальная открытость к небосводу. Для этих участков характерны: высокая инсоляция, повышенная испаряемость и формированием более засушливого микроклимата, что определяет развитие в пределах низкогорного – степных, фриганоидных

и шибляковых сообществ, в пределах среднегорного – горно-луговых.

Полуоткрытые склоны локализованы преимущественно вдоль горных хребтов, располагаясь полосами вдоль основных водоразделов, в частности, вдоль южного макросклона Главной гряды, а также в более глубоких ущельях, где небо частично закрывается противоположными берегами или склонами. Эти зоны представляют собой переходные ландшафтные позиции, отличающиеся умеренной инсоляцией и повышенной влажностью по сравнению с открытыми склонами. Здесь чаще всего формируются лесные массивы, особенно в условиях благоприятной влажности и защищенности от ветров.

Закрытые и полузакрытые склоны встречаются намного реже и составляют минимальную долю от общей площади (таблица 3.2.1). Они приурочены к отвесным южным стенам следующих горных вершин:

- Кокия-Кая (на мысе Айя) и Куш-Кая (к западу от мыса Айя);
- Мшатка-Каясы 651 м н. у. м., Малый Кильсе-Бурун 600 м н. у. м., Кильсе-Бурун 712 м н. у. м. Куба-Кая 662 м н. у. м. (к северу от пгт Санаторное);
- Мердвен-Каясы 856 м н. у. м., Балчик-Кая 945 м н. у. м., Кастропольская 955 м н. у. м., Треугольник 980 м н. у. м. (к северу от Берегового)
- Купол 1256 м н. у. м., Вестрон 1205 м н. у. м., Ай-Петри 1234 м н. у. м. (Ялтинский Горно-лесной природный заповедник)

Так же закрытые склоны присутствуют в Большом каньоне Крыма и ущелье Уч-Кош.

Эти участки характеризуются минимальной инсоляцией, высокой влажностью, слабой вентиляцией и развитием специфических экотопов – буковых лесов, дубовых из дуба черешчатого лесов, смешанных широколиственных, скальных сообществ.

С помощью инструмента «Zonal Statistics» в программе Qgis Desktop 3.40.12 были рассчитаны площади и доли каждого типа склонов по степени открытости (таблица 3.2.1).

Таблица 3.2.1. Доля площадей закрытых и открытых склонов от площади Горного Крыма

Тип склона	Площадь, км ²	Доля, %
Закрытые	2,161	0,02
Полузакрытые	17,539	0,20
Полуоткрытые	187,659	2,16
Открытые	8482,310	97,61

Анализ связи между степенью закрытости склона (SVF) и высотой над уровнем моря. Для оценки влияния абсолютной высоты на пространственную организацию

ландшафтов был проведён корреляционный анализ между классами фактора видимости неба Sky View Factor (SVF) и абсолютной высотой, полученной на основе цифровой модели рельефа SRTM (таблица 3.2.2). Корреляция Пирсона применяется для оценки линейной зависимости между двумя количественными переменными. Коэффициент корреляции r принимает значения от -1 до +1.

Таблица 3.2.2. Результаты корреляции Пирсона (высота и SVF)

Переменные	Коэффициент Пирсона (r)	p-уровень значимости
SVF – Высота (м)	-0,1915	< 0,001

Отрицательный знак коэффициента Пирсона указывает на наличие отрицательной связи, а показатель 0,19 говорит о слабой корреляции (< 0,3 – слабая связь). Р-уровень < 0.001 показывает, что вероятность случайного возникновения такой связи менее 0,1%. Так как в нашем случае переменная «SVF-класс» является порядковой: 1 – закрытые склоны, 4 – открытые склоны (чем выше порядковый номер класса – тем склон более открыт), то с увеличением высоты над уровнем моря значения SVF-класса имеют тенденцию к снижению, то есть склоны становятся более закрытыми.

Несмотря на слабую силу связи ($r = 0,19$), её статистическая значимость ($p < 0.001$) подтверждает, что **абсолютная высота является одним из факторов**, определяющих мезорегиональную организацию ландшафтов по признаку степени закрытости рельефа.

На основе совмещения двух растровых слоёв: классифицированной карты Sky View Factor (SVF), где каждому пикселю присвоен тип склона (1-4) и цифровой модели рельефа, были извлечены соответствующие значения высоты и медиан для каждого класса склонов с помощью инструмента «Zonal Statistics» (таблица 3.2.3).

Таблица 3.2.3. Средние и медианные значения высоты над уровнем моря по классам SVF

Тип склона	Средняя высота, м	Медиана, м
Закрытые	617	671
Полузакрытые	692	725
Полуоткрытые	660	642
Открытые	317	240

Наиболее закрытые склоны сосредоточены в пределах среднегорного ландшафтного уровня на участках со средними высотами 600-700 м, тогда как наиболее открытые – на

низкогорном ландшафтном уровне ($\approx 300\text{м}$). Слабая корреляция между абсолютной высотой и SVF, вместе с тем, что закрытые склоны сосредоточены не на вершинах, а в ущельях и склонах, указывает на то, что ключевую роль играет не абсолютная высота, а локальная геоморфологическая позиция, тогда как высота выступает лишь косвенным индикатором. Именно глубина долин и крутизна склонов, определяющие видимость неба, формируют пространственную структуру SVF.

Корреляционный анализ Пирсона между классами SVF и крутизной склонов показал статистически значимую, умеренную отрицательную связь ($r = -0.48$, $p < 0.001$). Это означает, что с увеличением угла наклона склона степень его открытости уменьшается. Это подтверждается и средними значениями крутизны: закрытые склоны имеют среднюю крутизну $53,1^\circ$, тогда как открытые расположены на пологих участках $6,0^\circ$ (таблица 3.2.4). Квадрат коэффициента корреляции ($r^2 = 0,231$) указывает, что крутизна склона объясняет 23.1% дисперсии в распределении классов SVF.

Таблица 3.2.4. Средние и медианные значения крутизны по классам SVF

Название	Средняя крутизна, °	Медиана, °
Закрытые	53,1	55,8
Полузакрытые	38,5	39,4
Полуоткрытые	26,2	27,2
Открытые	5,98	3,5

Интерактивная карта ландшафтно-топографической дифференциации Горного Крыма. Для комплексной визуализации пространственной структуры рельефа и его влияния на ландшафтные процессы была разработана интерактивная веб-карта, объединяющая четыре ключевых параметра:

- степень открытости склона (по SVF),
- ландшафтный уровень (по классификации Г.Е. Гришанкова),
- крутизна склона ($^\circ$),
- экспозиция склона (азимутальный аспект).

Карта доступна по ссылке: <http://ch808124.tw1.ru> (рисунок 3.2.3).

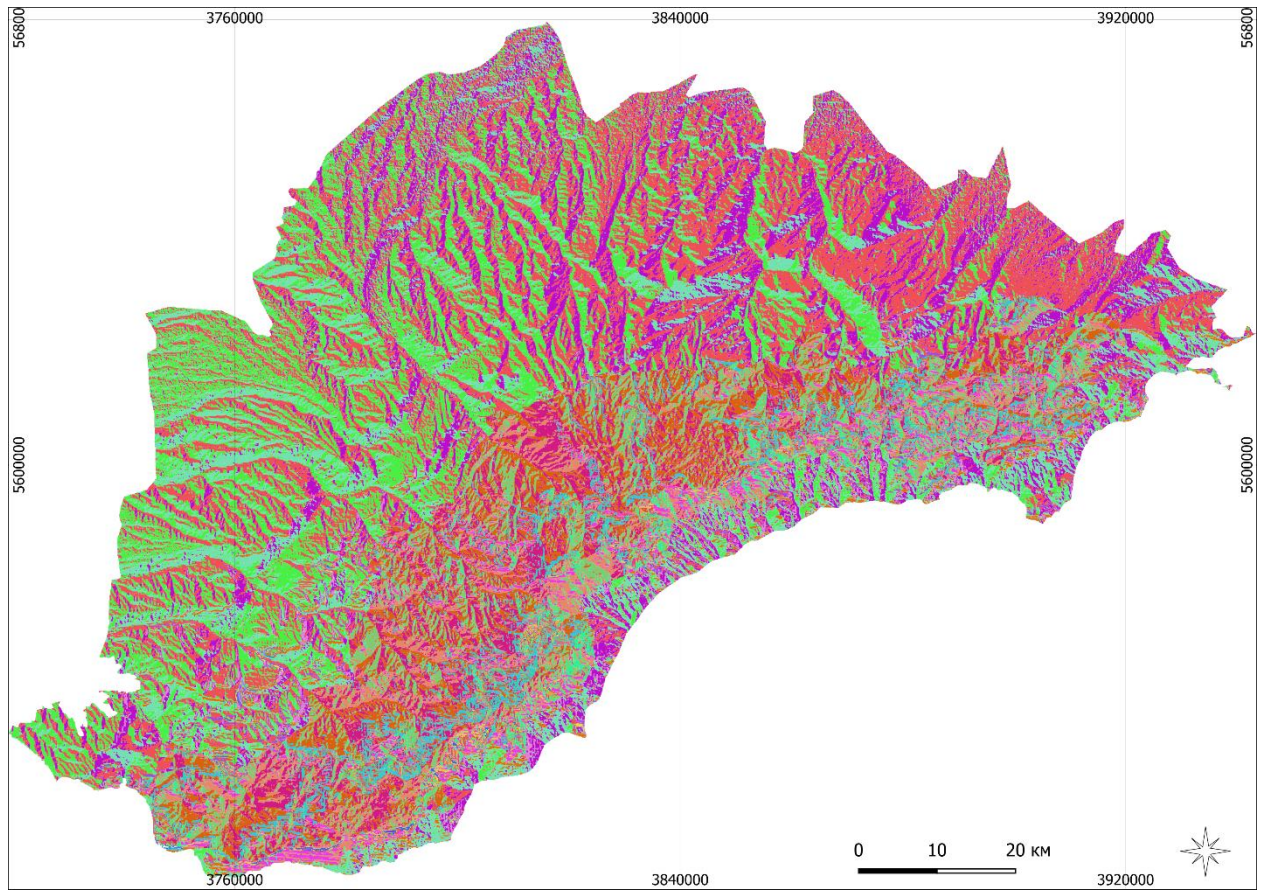


Рисунок 3.2.3 - Интерактивная карта ландшафтной позиции (ландшафтно-топографической дифференциации) Горного Крыма

Создание карты проходило в несколько этапов. Сначала был рассчитан коэффициент видимости небосвода (SVF) в SAGA GIS на основе цифровой модели рельефа, после чего значения были переклассифицированы на 4 условных класса – от «закрытых» (SVF 0,724–0,793) до «открытых» (SVF 0,931–0,999). Параллельно из ландшафтной карты Г.Е. Гришанкова был выделен слой ландшафтных уровней – высотной зональности (низкогорный ландшафтный уровень и среднегорный ландшафтный уровень).

Для расчёта крутизны использовался модуль Slope в QGIS, а экспозиции – модуль Aspect. Все четыре раstra были совмещены в единую геопространственную модель, где каждый пиксель содержит комбинацию параметров: например, «полузакрытый склон, среднегорный ландшафтный уровень, пологий, юго-западная экспозиция».

Крутизна склонов была классифицирована на три категории на основе анализа распределения уклонов в рельефе Горного Крыма:

- пологие – уклон менее 15°,
- средней крутизны – от 15° до 30°,
- крутые – 30° и более.

Такие пороги отражают реальные особенности среднегорного рельефа, где склоны свыше 15° уже характеризуются повышенной денудационной активностью, а участки круче 30° встречаются преимущественно в виде скальных уступов

Для визуализации и интерактивного анализа использовалась платформа QGIS + QGIS2Web, с последующей доработкой вручную для оптимизации легенды, всплывающих подсказок и фильтрации по слоям. На карте пользователь может:

- наводить курсор на любой участок и видеть полную характеристику;
- фильтровать по типам склонов или ландшафтным уровням;
- масштабироваться и перемещаться по территории.

Карта позволяет не только визуально оценить пространственную дифференциацию, но и использовать её как основу для дальнейших экологических, почвенных или климатических моделей — особенно там, где важна детальная привязка к рельефу и ландшафтному контексту.

Разработанная интерактивная веб-карта (ссылка открытого доступа <http://ch808124.tw1.ru>), интегрирующая данные по SVF (показатели степени открытости неба), ландшафтному уровню (низкогорному и предгорному), крутизне (представлены параметры) и экспозиции (рисунок 3.2.4).

Проведённый анализ с использованием количественного показателя Sky View Factor (SVF) позволил объективно и детально оценить ландшафтно-топографическую дифференциацию Горного Крыма, развивая концепцию Г.Е. Гришанкова об открытых и закрытых ландшафтных склонах.

Основные результаты:

- a. установлено доминирование в Горном Крыму открытых ландшафтных позиций: в регионе абсолютно преобладают (97,61%) открытые и полукрытые склоны ($SVF > 0,86$), что соответствует его геоморфологическому строению.
- b. установлена чёткая связь SVF с морфометрией рельефа: выявлена статистически значимая умеренная отрицательная корреляция ($r = -0.48$) между SVF и крутизной склона. Наиболее закрытые условия ($SVF \ 0.724\text{--}0.793$) формируются исключительно на крутых ($>50^\circ$) и часто отвесных склонах глубоких каньонов и ущелий (Большой каньон, Уч-Кош, склоны Ай-Петри и др.).
- c. определена высотно-ландшафтная приуроченность: закрытые и полукрытые склоны приурочены в основном к среднегорному ландшафтному уровню (средняя высота $\sim 600\text{--}700$ м), где тектонико-эрозионные процессы создают наиболее расчленённый рельеф.
- d. роль абсолютной высоты вторична: слабая корреляция SVF с абсолютной высотой ($r = -0.19$) доказывает, что ключевым фактором является не высота над уровнем моря, а локальная геоморфологическая позиция, определяющая степень экранирования небосвода.

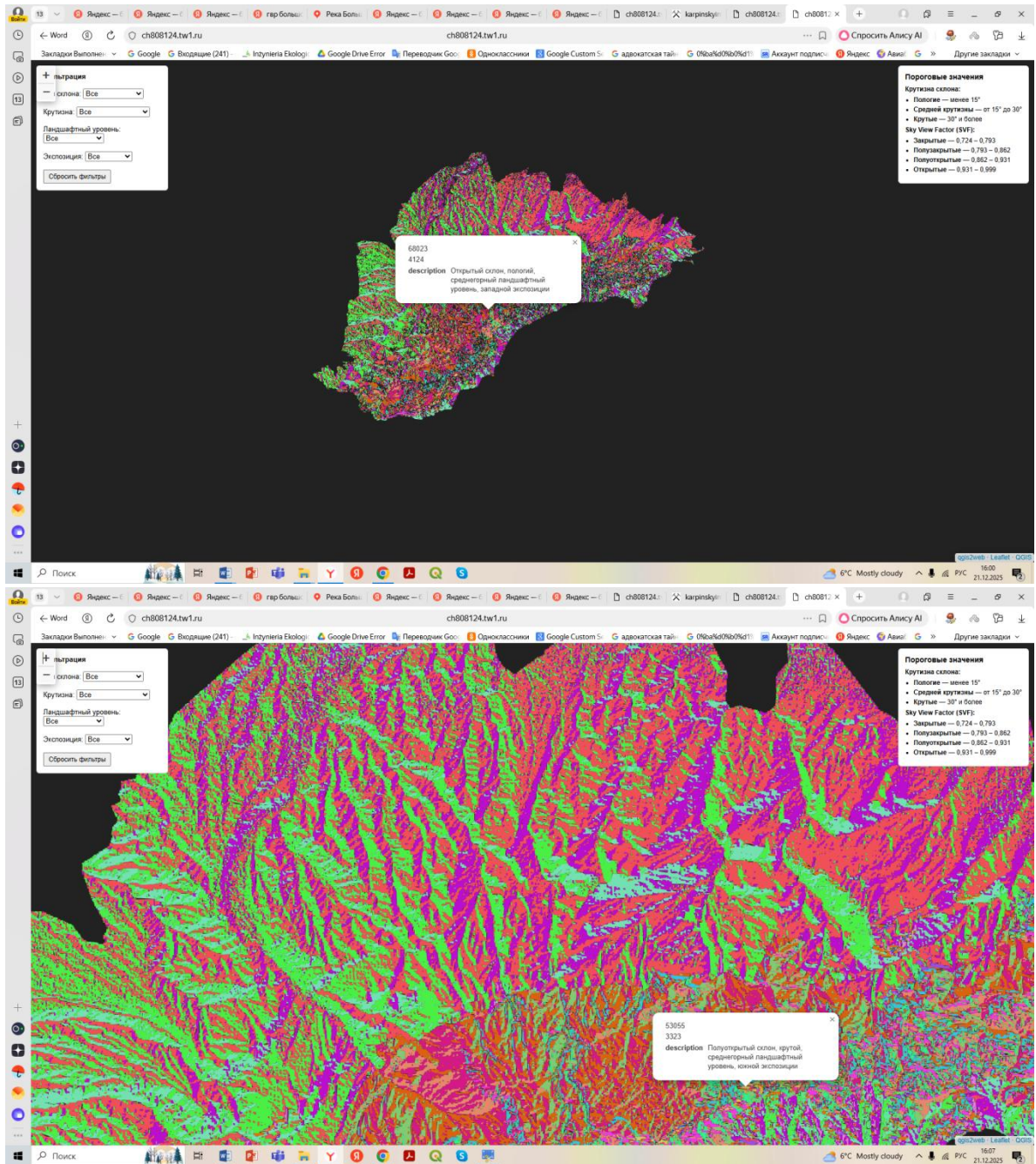


Рисунок 3.2.4 - Скриншот интерактивной карты ландшафтной позиции (ландшафтно-топографической дифференциации) Горного Крыма

Научная и практическая значимость:

а) методологическая - переход от качественной классификации по экспозиции к количественному GIS-анализу на основе SVF повысил точность и объективность выделения ландшафтных позиций;

б) прикладная - разработанная интерактивная веб-карта, интегрирующая данные по SVF, ландшафтному уровню, крутизне и экспозиции, служит ценным инструментом для комплексного анализа и моделирования экологических процессов, распределения почв и

растительности, а также для целей рационального природопользования и охраны природы в Горном Крыму.

Таким образом, применение метода SVF позволило не только верифицировать теоретические положения о дифференциации склонов, но и создать детальную цифровую основу для последующих ландшафтных и экологических исследований региона.

ЗАДАЧА 4. МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ ЛАНДШАФТОВ ГОРНОГО КРЫМА НА ЛОКАЛЬНЫМ УРОВНЕ

В отечественном ландшафтоведении особое внимание всегда уделялось геоморфологической основе. В работах А.Г. Исаченко и В.Б. Сочавы [1] - подчёркивалось, что рельеф формирует пространственный каркас геосистемы и задаёт условия для перераспределения энергии, влаги и вещества, определяя тем самым расположение и свойства природных комплексов локального уровня. Исследованием влияния геоморфологических факторов на организацию ландшафтов так же занимались Гвоздецкий Н.А., Преображенский В.С. [29]. Пространственная структура растительного покрова формируется под совокупным влиянием климатических, геолого-геоморфологических, гидрологических, биотических и антропогенных факторов. В качестве интегрального индикатора этого взаимодействия нами был использован вегетационный индекс EVI (Enhanced Vegetation Index), разработанный исследователями из команды NASA - Альфредо Хуэте и его коллегами [30]. Вегетационный индекс EVI лучше учитывает влияние атмосферы и фоновой поверхности (например, почвы), что делает его более точным в регионах с густой растительностью.

Принимаем условие, что вегетационный индекс – это **классический и мощный результирующий показатель организации ландшафта, он** выступает в роли **интегрального отклика** всей ландшафтной системы на совокупное действие формирующих ее геоэкологических факторов. Это результирующий показатель состояния сложно организованной геосистемы.

1. Расчёт вегетационных индексов, включая EVI, основан на разнице в отражении растениями света в красной и ближней инфракрасной зонах спектра, хорошо рассматриваемом на космических снимках, выполненных со спутника Landsat 8 в диапазонах 0,63-0,68 мкм (красный, Band 4) и 0,845-0,885 мкм (ближний инфракрасный, Band 5). Красный свет активно поглощается хлорофиллом, а клеточные структуры листа – отражают инфракрасное излучение. Поэтому, когда на лист падает солнечный свет (который содержит все длины волн, включая красный), хлорофилл "забирает" почти весь красный свет. В результате **здоровый, плотный растительный покров очень слабо отражает красный свет**. Чем больше хлорофилла в листьях, тем меньше красного света они отражают. **В ближней инфракрасной зоне спектра** внутренняя структура листьев (мезофилл) наоборот, очень хорошо отражает ближний инфракрасный свет. Растение почти не использует эту энергию, поэтому она отражается. Чем выше фотосинтетическая активность растений, тем ниже отражение в красной зоне и выше в инфракрасной – эти дешифрировочные признаки хорошо читаются на космоснимках. Различия коэффициентов спектральной яркости растений и их частей обуславливаются составом

и состоянием пигментов растительных и покровных тканей, морфологией растения в целом, возрастом, экологическими условиями [31].

2. Топографические и геоморфологические параметры, такие как высота, крутизна и экспозиция склона, формы и элементы рельефа, опосредованно через перераспределение тепла и влаги, определяют характер почвенного и растительного покрова [32]. Карта распределения вегетационного индекса EVI – это, по сути, карта дифференциации ландшафта. Она наглядно показывает границы между природными комплексами (урочищами, фациями), которые возникли из-за различий в фундаментальных факторах (рельеф, литология, увлажнение и др.) организации ландшафта, отражает продуктивность и густоту растительности. Таким образом, вегетационный индекс как результирующий показатель организации ландшафта показывает какие процессы и факторы привели к наблюдаемым свойствам ландшафта.

Цель данного исследования – оценить вклад геоморфологических факторов, определяющих геоэкологические условия территории, в формировании пространственной неоднородности ландшафтов предгорья Главной гряды Крыма с использованием вегетационного индекса EVI.

Для решения поставленной цели использовались описанные ни же методы исследования.

3. Для каждого полигона (поверхность выделенных элементов и форм рельефа в своих границах) объекта исследования рассчитаны средние значения EVI, на основе спутниковых снимков Landsat 8, полученных из общедоступного некоммерческого архива в сети Internet на сайте <http://glovis.usgs.gov> (Earth Resources Observation and Science Center (EROS), U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey) [33]. Для проведения статистического анализа использованы данные по 43 полигональным участкам, расположенных в пределах изучаемой территории. На основе цифровой модели рельефа [33] построены карты экспозиции, крутизны склона, топографического индекса влажности TWI (количественный показатель, применяемый для оценки потенциального накопления влаги в почве на основе рельефа местности) [34], абсолютных высот, элементов и форм рельефа в ГИС-платформе Qgis Desktop 3.40.12. Расчеты проводились с использованием модуля Processing Toolbox → SAGA GIS → Terrain Analysis (алгоритм «Topographic Wetness Index») и Raster Terrain Analysis.

Статистический анализ включал корреляцию Спирмена для оценки связи между количественными топографическими параметрами и вегетационным индексом EVI, однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим применением пост-хок теста Тьюки для сравнения средних значений EVI между склонами разной экспозиции. Расчёты выполнены в программе JASP.

Модель множественной линейной регрессии построена и проанализирована в том же программном обеспечении. В качестве предикторов включены: тригонометрические компоненты экспозиции склона (Sin и Cos), средняя крутизна, топографический индекс влажности TWI и фиктивные переменные для элементов и форм рельефа (балка, пойма, водораздел; базовая категория – «склон»). Высота над уровнем моря исключена из модели из-за высокой корреляции с другими параметрами.

Данные методы были выбраны в связи с тем, что благодаря им можно не только выявить наличие или отсутствие связей между переменной EVI и факторами предикторами, но и доказать их статистическую значимость и достоверность с помощью показателя p -value, при этом значение $p < 0,05$ свидетельствует о том, что выявленные связи маловероятно возникли случайно.

Выявление главных геоморфологических и топографических факторов, определяющих пространственное распределение вегетационного индекса EVI в предгорье Главной гряды Крымских гор, производилось на примере ключевого участка (рисунок 4.1). Исследуемый участок расположен в Балаклавском районе в 860 метрах к северу от села Родное. На северо-востоке район исследования занимает часть сельского поселения Терновка. В северо-восточной части участка протекает река Ай-Тодорка. В его пределах расположены следующие вершины: Чамхалых-Бурун (273 м н. у. м.), Устен-Тепе (276 м н. у. м.) и Зыбук-Тепе (451 м н. у. м.).

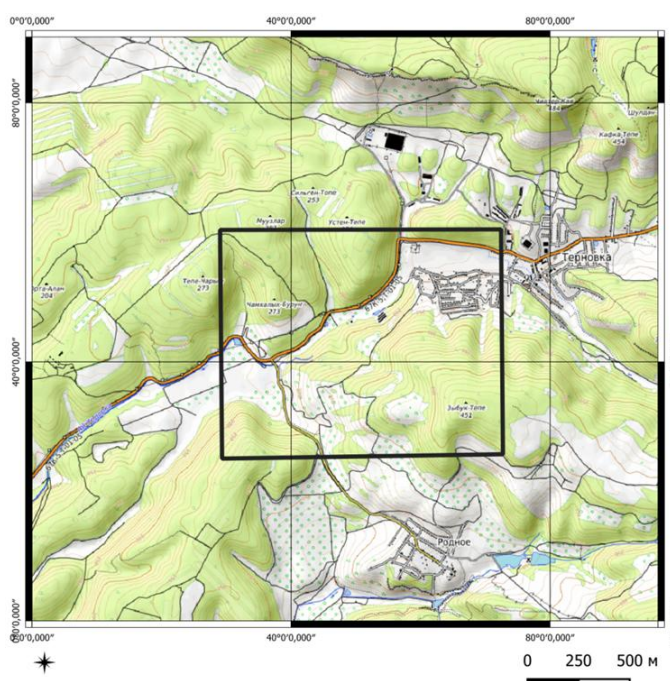


Рисунок 4.1 - Географическое положение исследуемого участка предгорного ландшафтного уровня

Предварительный анализ пространственной изменчивости. Для рельефа объекта исследования характерны небольшие перепады высот, слабо расчленённый рельеф. Диапазон распределения высоты над уровнем моря 150-450 м. Наибольшее число полигонов обладает высотами 200-250 м (рисунок 4.2).

Гистограммы распределения показали, что территория характеризуется от умеренной до высокой растительной активностью (EVI 0,5-0,70). Большинство полигонов имеют среднее значение EVI (0,48). На рисунке 4.2 видно, что преобладают пологие и умеренно крутые склоны (от 1° до $17,5^\circ$). Пик гистограммы распределения крутизны приходится на $13-14^\circ$, много участков с уклоном около 9 градусов. Почти нет крутых склонов ($>16^\circ$). Есть небольшое

количество участков с уклоном $<3^\circ$ – возможно, днища долин или равнины. Территория преимущественно холмистая с умеренным уклоном; мало плоских и очень крутых участков – благоприятна для сельского хозяйства.

Диапазон распределение топографического индекса влажности TWI: 6-16 – от умеренно влажных до очень влажных участков. Наибольшее количество полигонов выявлено при TWI 6-7 – большинство участков имеют низкую/умеренную влажность. Очень мало участков с TWI >12 значит, почти нет постоянно увлажнённых зон. TWI = 16 – единичные точки, возможно, днища оврагов или родники.

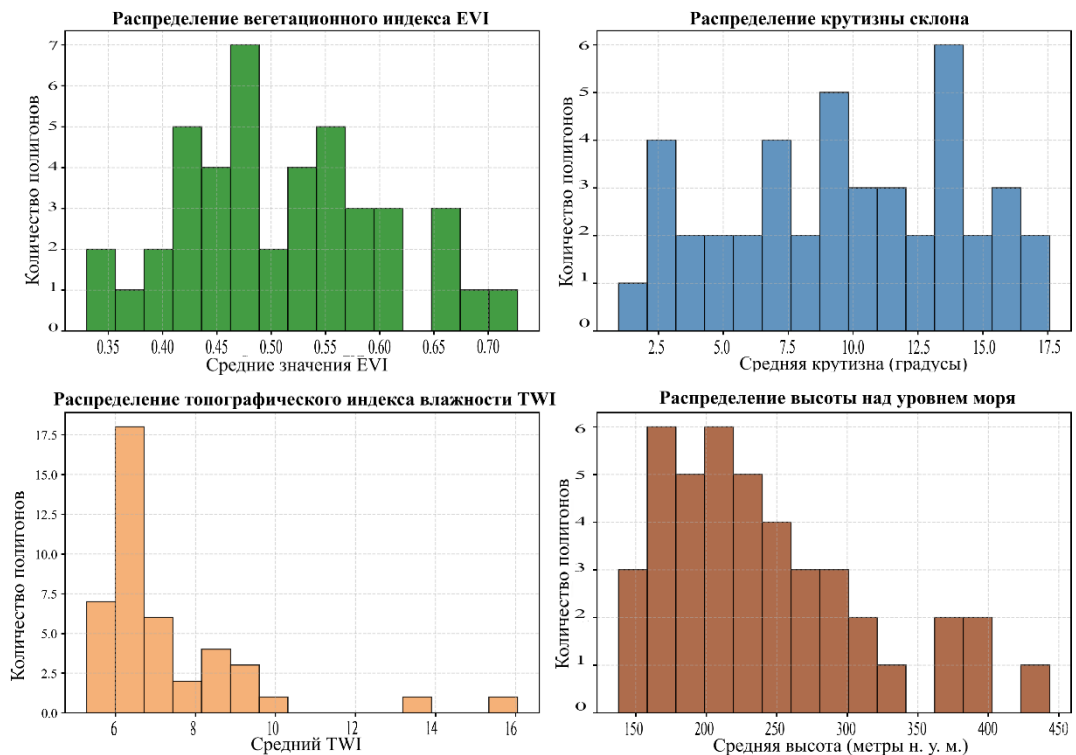


Рисунок 4.2 - Распределение ключевых ландшафтных характеристик по полигонам территории

Корреляционный анализ Спирмена. На исследуемой территории наиболее выраженная взаимосвязь выявлена между крутизной склона и топографическим индексом влажности (0,51) – соответствует логике, что крутым склонам свойственна низкая влажность почв, а влажные зоны сосредоточены в относительно плоских понижениях рельефа. Рассчитываем корреляцию Спирмена (таблица 4.1).

Таблица 4.1 - Данные результатов расчета корреляции Спирмена

	EVI_mean	Slope_mean	TWI_mean	Elevation_mean
EVI_mean	1	0,18	-0,19	-0,1
Slope_mean	0,18	1	-0,51	0,21
TWI_mean	-0,19	-0,51	1	-0,36
Elevation_mean	-0,1	0,21	-0,36	1

Отрицательная корреляция между TWI (топографическим индексом увлажненности) и EVI (вегетационный индекс) может указывать на то, что самые влажные участки (долины) либо не покрыты растительностью (например, заняты под дороги, также из спутникового снимка видны пашни (коричневые/серые участки), которые могут иметь низкий EVI). Помимо этого, TWI – говорит, где вода может накапливаться, но не учитывает: тип почвы, глубину залегания грунтовых вод.

Связь вегетационного индекса EVI с топографическими параметрами очень слабая (0,2), что говорит о доминирующем влиянии других факторов на распределение растительности (рисунок 4.3).

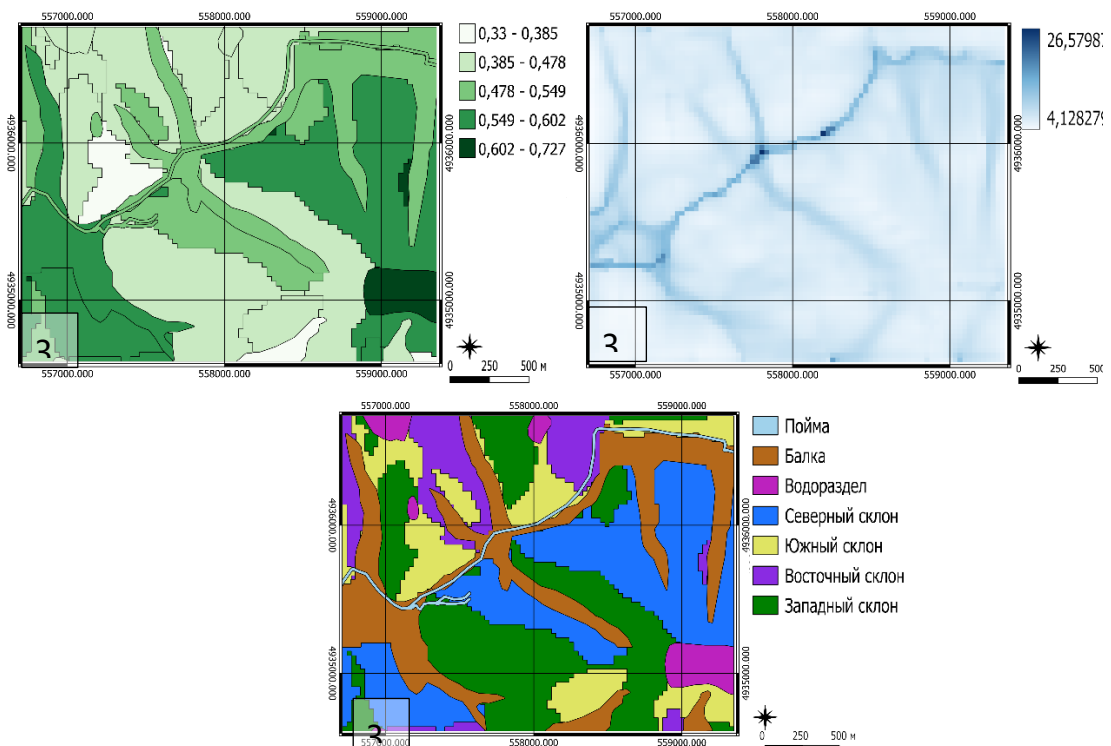


Рисунок 4.3 - Распределение средних значений вегетационного индекса EVI по местоположениям (3а) и топографического индекса увлажненности (TWI) (3б), элементы и аормы рельефа локального участка (3в)

Влияние экспозиции склона дисперсионный анализ (ANOVA). Дисперсионный анализ (ANOVA) проводился с целью проверить влияет ли направление склона на исследуемую величину (EVI). Проанализированы направления: северные, восточные, западные, южные склоны. Результаты дисперсионного анализа ANOVA приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Результаты дисперсионного анализа ANOVA

Источник вариации	Сумма квадратов	df степени свободы	F-статистика	PR(>F) (p-значение)
Межгрупповая вариация средних EVI	0,0782	3	3,28	0,0348
Внутригрупповая вариация средних EVI	0,2303	29	-	-

4. Отношение межгрупповой дисперсии к внутригрупповой ($F = 3,28$) достаточно значимое $n=33$ (количество контуров разной экспозиции), говорит о наличии различий в средних показателях EVI между склонами разной экспозиции. Так как $p\text{-value} = 0,0348$, что ниже порога 0,05 (условная граница, которую принято использовать как приемлемый риск ошибиться) [35], с вероятностью ошибки менее чем в 5% случаев мы можем утверждать, что хотя бы одно из направлений склона действительно отличается по среднему значению от других. Для того чтобы выявить какое именно необходимо использовать метод множественных сравнений (пост-хок тест Тьюки). Результаты пост-хок теста Тьюки приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Результаты пост-хок теста Тьюки

Группа 1	Группа 2	Разница средних значений	p-adj	lower	upper
Западный склон	Восточный склон	-0,0731	0,2673	-0,1801	0,034
Северный склон	Восточный склон	-0,0133	0,996	-0,1752	0,1486
Южный склон	Восточный склон	-0,1244	0,0292	-0,2388	-0,0099
Северный склон	Западный склон	0,0598	0,7281	-0,0969	0,2165

Южный склон	Западный склон	-0,0513	0,5669	-0,1584	0,0558
Южный склон	Северный склон	-0,1111	0,2629	-0,273	0,0508

На первый взгляд, кажется, что восточные склоны имеют самый высокий EVI. Но чтобы быть уверенными, что это не случайность, мы провели статистический анализ.

Результат показал: единственная значимая разница - между Восточными и Южными склонами: разница средних = -0,1244. Среднее EVI на восточном склоне на 0,1244 выше, чем на южном; доверительный интервал [-0,2388, -0,0099]: не включает 0, значит различие надёжное $p\text{-adj} = 0,0292$: после поправки на множественные сравнения остаётся менее 0,05, следовательно значимо. Это означает, что именно в восточном направлении растительность действительно активнее, что может быть связано с климатическими особенностями экспозиции. Южные склоны – более сухие и тёплые: сильнее прогреваются, быстрее высыхают, восточные склоны – получают утреннее солнце, но избегают жаркое послеполуденное время, растительность получает меньше стресса от жары и засухи. Различия между всеми остальными парами направлений склонов были статистически незначимыми (все $p\text{-adj} > 0,05$).

Совместное влияние факторов (множественная регрессия). Для выявления ключевых факторов, определяющих пространственную изменчивость вегетационного индекса растительности EVI была построена модель множественной линейной регрессии, по формуле

$$\text{EVI_mean} = \beta_0 + \beta_1 \times \text{Sin_mean} + \beta_2 \times \text{Cos_mean} + \beta_3 \times \text{Slope_mean} + \beta_4 \times \text{TWI_mean} + \beta_5 \times \text{is_водораздел} + \beta_6 \times \text{is_балка} + \beta_7 \times \text{is_пойма} + \varepsilon \quad (1),$$

где β_0 - константа;

β_1 – β_7 – коэффициенты регрессии;

ε – остаток (ошибка модели).

В качестве независимых переменных (предикторов) были включены следующие параметры:

морфометрические предикторы:

- топографический индекс влажности (twi_mean) – характеризует потенциальное накопление влаги в рельефе;
- средняя крутизна склона (slope_mean);
- тригонометрические компоненты экспозиции склона (sin_mean и cos_mean) – обеспечивают непрерывное представление направления склона;

элементы и формы рельефа:

- балки, пойма, водоразделы.

Базовой категорией служил «склон», относительно которого интерпретируются коэффициенты остальных переменных (см. таблицу 4.4): каждый из них отражает среднюю разницу в значении EVI между соответствующей категорией (балка, пойма, водораздел) и склоном при прочих равных условиях (одинаковая экспозиция, крутизна и т.д.). Высота над уровнем моря изначально рассматривалась как потенциальный предиктор, но в итоге была исключена, поскольку почти дублирует информацию, уже содержащуюся в других переменных (форме рельефа и морфометрических параметрах). В таких условиях модель не может точно определить, какому из факторов принадлежит наблюдаемый эффект.

Таблица 4.4 - Результаты множественной линейной регрессии зависимости EVI от морфометрических и геоморфологических факторов

Переменная	Коэффициент	Стандартная ошибка	t-статистика	p-значение
Константа	0,4614	0,0188	24,54	<0,001
TWI	0,0038	0,0031	1,21	0,237
Крутизна	0,0008	0,0018	0,44	0,665
Sin	0,0523	0,0200	2,62	0,012
Cos	0,0841	0,0181	4,65	<0,001
Is_Балка	-0,0209	0,0211	-0,99	0,329
Is_Пойма	-0,0115	0,0270	-0,43	0,673
Is_Водораздел	-0,0132	0,0175	-0,75	0,457
Модель в целом				
R ²	0,392			
Скорректированный R ²	0,271			
F(7, 25)	3,25			0,0096

Поскольку коэффициенты множественной линейной регрессии при Cos (+0,0841) и Sin (+0,0523) положительны и статистически значимы, это означает, что чем выше значения этих тригонометрических переменных у конкретного участка, тем выше на нём EVI; при этом *максимальные значения Cos_mean (близкие к +1) характерны для северных склонов, а максимальные значения Sin_mean (близкие к +1) – для восточных, что указывает на наиболее благоприятные условия для растительности на склонах северо-восточной*

экспозиции, где сочетаются тень (в случае северных склонов) и утреннее освещение (в случае восточных), что снижает испарение и способствует сохранению влаги.

В то же время ни одна из геоморфологических форм рельефа (балки, поймы, водоразделы) не оказала статистически значимого влияния на EVI по сравнению с базовой категорией «склон». Отрицательные коэффициенты множественной линейной регрессии означают, что в среднем вегетационный индекс EVI в этих формах рельефа немного ниже, чем на склонах с теми же морфометрическими характеристиками. Однако эта разница настолько мала, что нельзя считать её статистически достоверной ($p > 0,05$).

Показатели топографического индекса влажности (TWI) и крутизны склона, несмотря на положительные коэффициенты множественной линейной регрессии, также не достигли статистической значимости, что указывает на второстепенную роль этих геоэкологических факторов по сравнению с экспозицией в формировании пространственной структуры растительности, а следовательно, и ландшафтов, в условиях предгорья Крымских гор.

Таким образом, проведённое исследование позволило установить ключевую роль экспозиции склонов в формировании пространственной структуры растительного покрова северо-западного предгорья Крымских гор на примере локального участка, а, следовательно, и структуры ландшафтов. Несмотря на ожидаемую связь растительности с увлажнением (TWI) и энергией рельефа, именно ориентация склона по оси восток-запад оказалась наиболее значимым фактором, определяющим показатели вегетационного индекса EVI. Наиболее высокие значения EVI характерны для участков с северо-восточной экспозицией, что может быть связано с благоприятным микроклиматом (благоприятные условия сочетания тепла и влаги): северные склоны получают меньше прямой солнечной радиации, а на восточных уменьшается интенсивность послеполуденного перегрева, что снижает испарение и способствует сохранению влаги.

Несмотря на ожидаемую связь вегетационного индекса и показателей крутизны склонов, топографического индекса влажности (TWI), форм и элементов рельефа (балки, поймы, водоразделы), их вклад оказался статистически незначимым в пределах исследуемой территории. Это объясняется тем, что формы рельефа и морфометрические характеристики исследуемого участка, либо уже включены в экспозиционный эффект, либо играют второстепенную роль в условиях умеренно холмистого ландшафта с преобладанием средне влажных участков.

В пределах изученного района экспозиция склона выступает доминирующим геоэкологическим фактором в организации пространственной структуры ландшафтов локального уровня, что имеет важное значение для ландшафтного планирования, оценки агропотенциала и прогнозирования реакции экосистем на климатические изменения.

**ЗАДАЧА 5. СИСТЕМА ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ КАРТ ОРГАНИЗАЦИИ
ЛАНДШАФТОВ ГОРНОГО КРЫМА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ
ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ФАКТОРОВ,
ВЫПОЛНЕННЫХ В ГИС-ПРОГРАММАХ**

Для выполнения карт использовалась ГИС-программа Qgis Desktop 3.40.12. Исследование проводилось с применением метода кластерного анализа Горного Крыма с использованием цифровых карт геоморфологических и биофизических параметров. Исходные данные для кластерного анализа включали следующие растровые слои (предикторы):

- SRTM – модель цифровой высоты (DEM), отражающая гипсометрические особенности рельефа;
- TWI (Topographic Wetness Index) – индекс топографической увлажнённости, характеризующий потенциальное распределение влаги по поверхности;
- Крутизна склонов – производный параметр рельефа
- EVI (Enhanced Vegetation Index) – вегетационный индекс растительности, отражающий фитомассу и продуктивность растительного покрова [30].

Карта кластеризации визуализирует группы пикселей/участков со схожими характеристиками, полученными в результате многомерного кластерного анализа.

10. Граница Горного Крыма была проведена согласно ландшафтной карты Г.Е. Гришанкова. Карты TWI и крутизны склонов Горного Крыма были построены на основе на основе цифровой модели рельефа [33] в ГИС-платформе Qgis Desktop 3.40.12. Расчеты проводились с использованием модуля Processing Toolbox → SAGA GIS → Terrain Analysis (алгоритм «Topographic Wetness Index») и Raster Terrain Analysis (рисунки 5.1, 5.2).

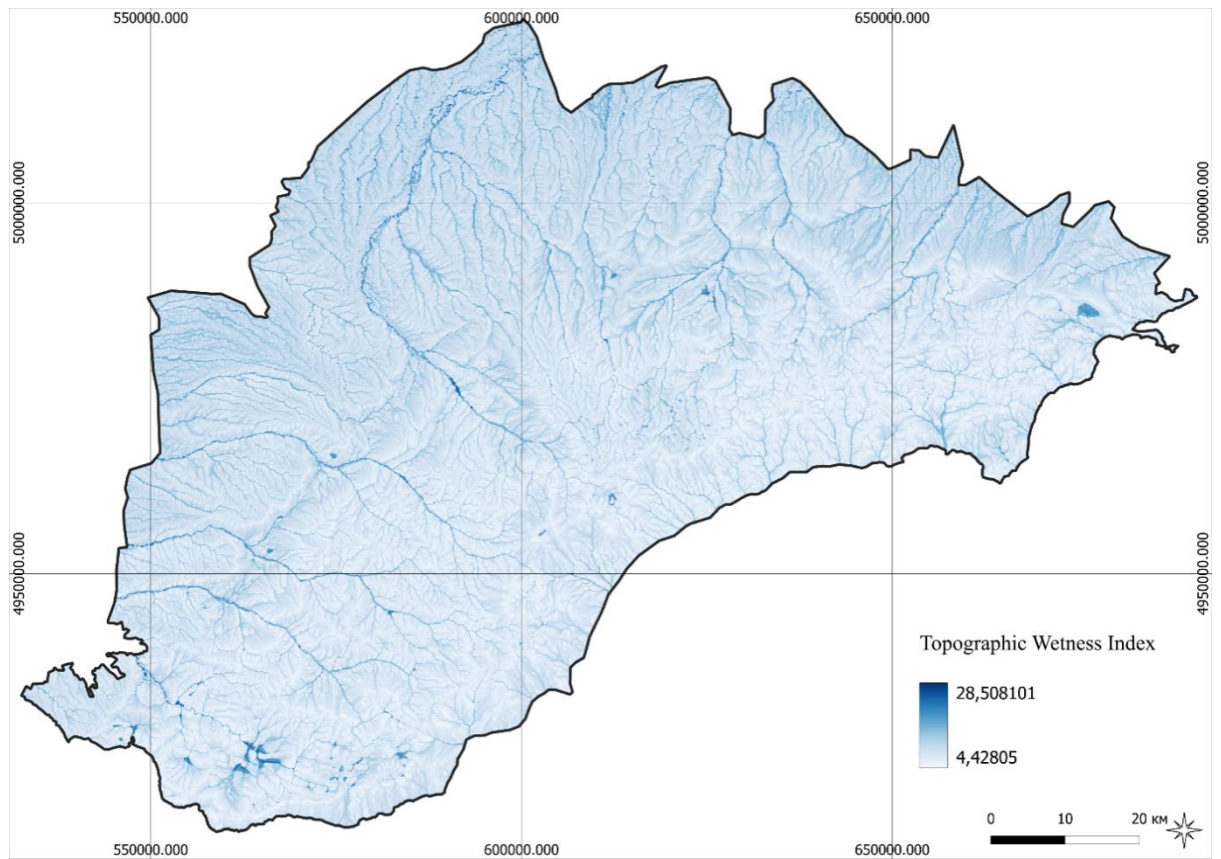


Рисунок 5.1 - Распределение топографического индекса увлажнения Горного Крыма

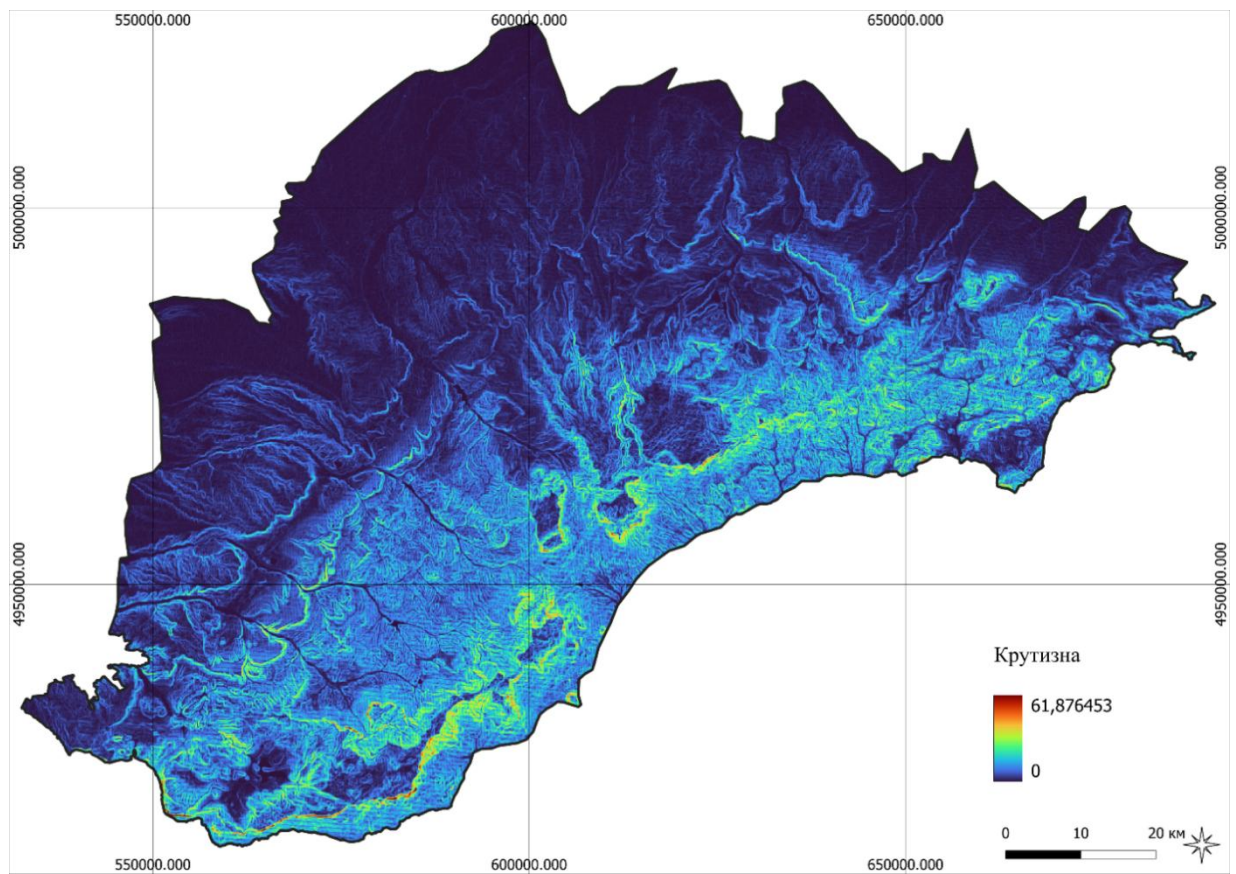


Рисунок 5.2 - Карта крутизны рельефа Горного Крыма, в градусах (°)

На основе спутниковых снимков Landsat 8, полученных из общедоступного некоммерческого архива в сети Internet на сайте <http://glovis.usgs.gov> (Earth Resources Observation and Science Center (EROS), U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey) [33] была построена карта распределения вегетационного индекса EVI за апрель 2021 (рисунок 5.3).

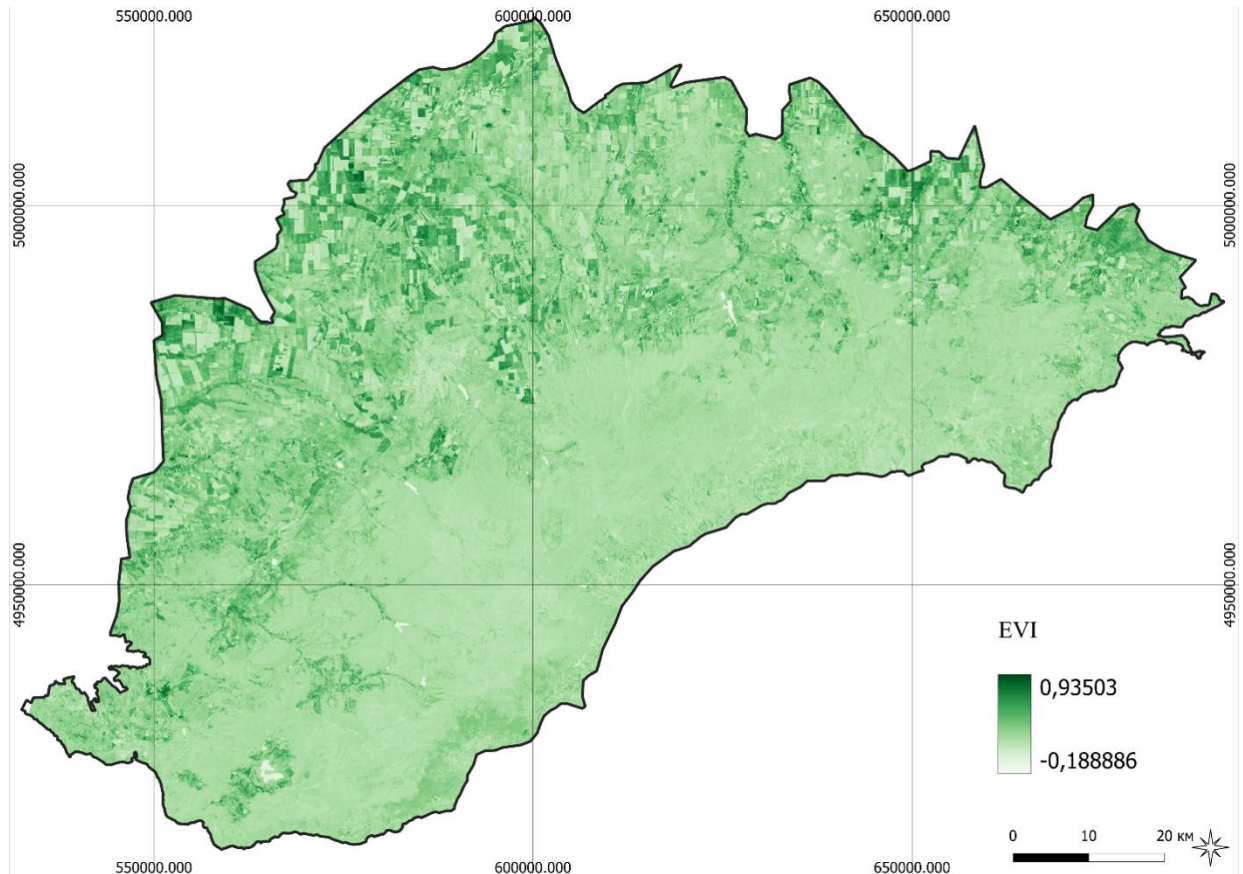


Рисунок 5.3 - Распределение вегетационного индекса EVI в Горном Крыму

Усовершенствованный вегетационный индекс (EVI – Enhanced Vegetation Index) представляет собой «оптимизированный» вегетационный индекс, предназначенный для усиления сигнала растительности с повышенной чувствительностью в регионах с высокой биомассой и улучшенным мониторингом растительности за счет отделения фонового сигнала растительного покрова и уменьшения влияния атмосферы [36].

Рассчитывался по формуле:

$$EVI = \frac{2,5(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{\rho_{NIR} + 6\rho_{RED} - 7,5\rho_{BLUE} + 1}$$

где:

ρ_{NIR} - значения спектральных яркостей аэрокосмического изображения в ближней

инфракрасной области спектра;

pRED – значения спектральных яркостей аэрокосмического изображения в красной области спектра;

pBLUE – значения спектральных яркостей аэрокосмического изображения в синей области спектра.

Разница в отражении растениями света в синей, красной и ближней инфракрасной зонах спектра, хорошо рассматриваемы на космических снимках, выполненных со спутника Landsat 8 в диапазонах 0,63-0,68 мкм (красный, Band 4), 0,845-0,885 мкм (ближний инфракрасный, Band 5) и 0,452 до 0,512 мкм (синий, Band 2) (рисунок 5.4).

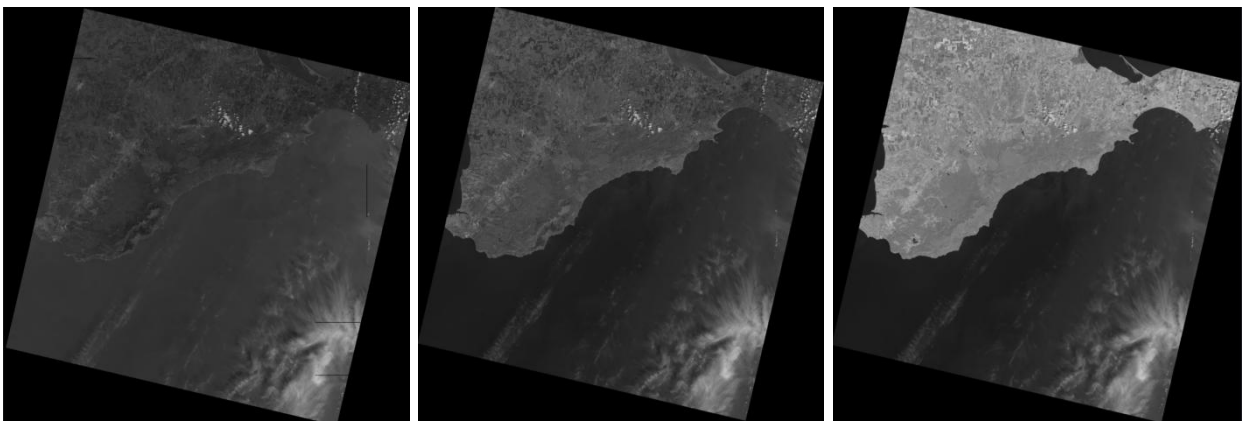


Рисунок 5.4 - Космические снимки Landsat 8, выполненный во 2,4 и 5 канале соответственно

Все данные были приведены к единой проекции (WGS84 / UTM zone 36N) и пространственном разрешении (30 м).

Для обеспечения сопоставимости показателей, измеренных в различных физических единицах или имеющих разные диапазоны значений, все переменные, использованные в кластерном анализе, были подвергнуты стандартизации. Стандартизация выполнялась по следующей формуле:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

где:

x – исходное значение пикселя (или наблюдения) для данной переменной,

μ – среднее значение этой переменной по всему исследуемому пространству (или выборке),

σ – стандартное отклонение (мера разброса) этой переменной.

Кластеризация проведена в среде QGIS Desktop 3.40.12 с использованием алгоритма K-means ($k = 2, 5, 13$), который позволил выделить устойчивые типы ландшафтных структур на основе схожести комбинации указанных факторов.

Кластер – это группа объектов (пикселей растра, векторов полигонов или точки на карте), которые похожи друг на друга по определенному набору признаков (факторов) и в то же время отличаются от объектов других групп.

Алгоритм K-means делает следующее:

- $K = 2$ (самое высокое обобщение) - территория будет разделена всего на два фундаментальных типа. *Это грубая, но очень устойчивая модель, выявляющая базовую дифференциацию ландшафта.*
- $K = 5$ (оптимальная детализация) - позволяет выделить основные элементы ландшафтной структуры, понятные для интерпретации (кластер 1 - водораздельные плато, кластер 2 - крутые склоны южной экспозиции; кластер 3 - крутые склоны северной экспозиции; кластер 4 - пологие подножия склонов; кластер 5 - донные части долин и тальвеги. *Это, вероятно, самый информативный и интерпретируемый результат, где кластеры соответствуют реальным геоморфологическим элементам.*
- $K = 13$ (высокая детализация) - выделяются более тонкие, нюансированные подтипы. Например, можно отделить очень крутые склоны от просто крутых, или выделить разные типы пойм.

Кластеры — не просто абстрактные группы чисел. Они имеют географическую привязку и ландшафтный смысл. Скорее всего, они образуют на карте целостные ареалы, соответствующие реальным формам рельефа (плакоры, склоны, долины). Анализ ведется по схожести комбинации факторов. Объекты попали в один кластер не потому, что у них одинаковый TWI или одинаковый уклон, а потому что у них похожая совместная комбинация всех факторов. Например, в один кластер могут попасть участки с умеренным TWI и очень крутым уклоном и участки с низким TWI и средним уклоном, если в многомерном пространстве они оказались "близки". Алгоритм видит многомерную схожесть.

Кластер в нашем исследовании – это не просто группа пикселей, а формализованный, количественно обоснованный тип ландшафтной структуры, выделенный по комплексу факторов.

Для определения средних значений предикторов для каждого кластера и построения таблиц использовалась функция Zonal Statistics в программном обеспечении QGIS. Полученные кластеры интерпретированы как цифровые аналоги ландшафтных уровней и зон, сопоставимые с традиционной физико-географической типологией.

Анализ низкогорного и среднегорного ландшафтного уровня выделенных методом кластеризации. Результат кластеризации, осуществлений по вышеописанной методике, приведен на рисунке 5.5, где выделены низкогорный и среднегорный ландшафтные уровни. Полученные кластеры демонстрируют чёткую пространственную дифференциацию ландшафтов, соответствующую известным морфоструктурным и

климато-экологическим градиентам Горного Крыма.

На основе многомерной кластеризации, были созданы карты, представляющие собой территорию, разделенную на два основных ландшафтных уровня, каждый из которых характеризуется уникальным сочетанием высоты, крутизны склона, индекса увлажненности (TWI) и плотности растительности (EVI). Получена обобщённая карта ландшафтной структуры Горного Крыма, включающая два основных кластера, соответствующих двум ландшафтным уровням: кластер 1 – низкогорный ландшафтный уровень; кластер 2 - среднегорный ландшафтный уровень (рисунок 5.5). Построена таблица средних значений параметров предикторов (высота, крутизна, TWI, EVI) для каждого кластера (таблица 5.1).

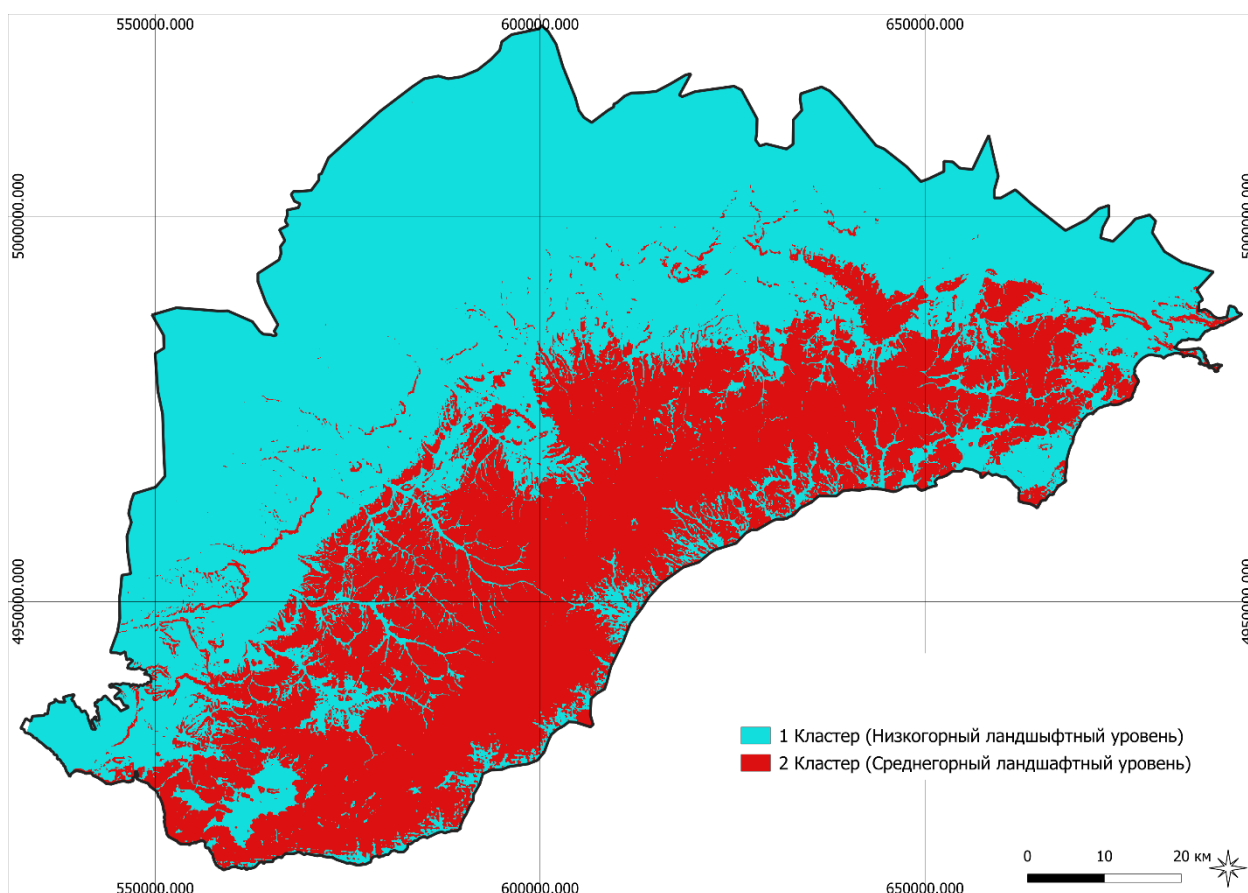


Рисунок 5.5 - Результат кластеризации ($k=2$), кластер 1 – низкогорный ландшафтный уровень; кластер 2 – среднегорный ландшафтный уровень

Таблица 5.1 - Средние значения параметров кластеризации для каждого кластера

Кластер	м ²	Высота_mean	TWI_mean	Крутизна_mean	EVI_mean
1	5311886072	182,6650519	10,1564854	2,55865352	0,30661967
2	3279348238	556,2209984	7,44973873	12,82844883	0,21045239

Кластер 1 (низкогорный ландшафтный уровень) характеризуется средними значениями: абсолютной высоты (183 м), пологим рельефом ($2,6^\circ$) и повышенной топографической увлажнённой (TWI = 10,16) и относительно высокой продуктивностью растительного покрова (EVI = 0,307). Такие параметры соответствуют низкогорному ландшафтному уровню, а именно предгорным аккумулятивным и останцово-денудационным равнинам, где развиты разнотравные степи, кустарниковые заросли и лесостепные комплексы. Низкая крутизна способствует накоплению влаги (высокий TWI), что объясняет более густую и продуктивную растительность по сравнению со среднегорным уровнем, несмотря на более низкую высоту.

Кластер 2 (среднегорный ландшафтный уровень) расположен значительно выше (556 м), имеет крутое рельефное расчленение ($12,8^\circ$), пониженную увлажнённую (TWI = 7,45) и сниженную растительную продуктивность (EVI = 0,210). Эти характеристики соответствуют среднегорному ландшафтному уровню, включающему северный и южный макросклоны Главной гряды с развитыми широколиственными лесами, а также яйлинские плато. Высокая крутизна способствует стоку влаги, что объясняет снижение TWI и, как следствие, более разреженный растительный покров на склонах. При этом важно отметить: более высокая абсолютная высота не приводит к повышению EVI, что может быть связано как с экспозиционной засушливостью южных склонов, так и с антропогенной трансформацией растительности.

Прослеживается высокая степень соответствия границ низкогорного и среднегорного ландшафтных уровней, выделенных посредством кластеризации и системой экспертных методов, используемых Г.Е. Гришанковым [23], при составлении им ландшафтной карты Крыма (рисунок 5.6). Цифровая модель организации ландшафтов с применением 2х кластеров лишь подтверждает подход к выделению ландшафтных уровней Г.Е. Гришанкова и количественно обосновывает его. Для выявления новых закономерностей необходимо переходить к более подробному делению – на зоны и пояса и применять кластеризацию с пятью градациями и выше.

Анализ пяти ландшафтных зон, выделенных методом кластеризации. В результате многомерного кластерного анализа, было выявлено 5 ландшафтных зон, соответствующих классификации Г. Е. Гришанкова (рисунок 5.6).

Для первичной классификации использовался алгоритм кластеризации K-means, однако итоговое выделение ландшафтных зон проводилось экспертно на основе пространственной группировки и геоморфологических характеристик. Так как алгоритм кластеризации лишь объединяет объекты по математической близости в пространстве заданных параметров, без логической интерпретации не обойтись. Выделены следующие зоны по компоновки карты:

Кластеры:

- 1 – Зона северного макросклона среднегорного ландшафтного уровня
- 1+3 – Зона южного макросклона низкогорного ландшафтного уровня
- 2 – Зона яйлинских плато среднегорного ландшафтного уровня

3+4 – Зона предгорья низкогорного ландшафтного уровня

5 – Зона южного макросклона среднегорного уровня

Результаты зональной статистики по кластерам представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Средние значения параметров кластеризации для каждого кластера

Кластер	км ²	Высота_mean	TWI_mean	Крутизна_mean	EVI_mean
1	2 201,44	382,6414112	7,51573353	10,84048139	0,21963233
2	654,29	945,019237	8,19706548	8,28293334	0,2057754
3	3 104,69	193,9594224	9,2708479	2,75335279	0,24780941
4	1 201,62	157,7946455	10,19506271	1,89857634	0,48382944
5	621,07	655,686691	6,59692905	23,4253126	0,20348933

Карта кластеров (k=5) отражает чёткую вертикальную зональность: от высокогорных плато на вершинах до низменных предгорий у подножия.

Самая высокая часть – Яйлинские плато (кластер 2) – занимает вершинные участки на высоте около 945 метров (средняя высота). Это характерно для среднегорного ландшафтного уровня, где рельеф становится более пологим, а растительность – горнолуговая и лесная. Крутизна склонов здесь умеренная (8,3°), что соответствует представлению о плато как о равнинной поверхности на большой высоте.

Ниже, на склонах, выделяются две зоны, которые можно интерпретировать как северный макросклон среднегорья (кластер 1) и южный макросклон среднегорья (кластер 5). Эти зоны имеют принципиально разные характеристики. Зона северного макросклона (кластер 1) находится на средней высоте 383 м, имеет умеренную среднюю крутизну (10,8°) и низкую плотность растительности (EVI=0,22). Зона южного макросклона (кластер 5) – значительно выше (656 м), но при этом очень крутой (23,4°) и достаточно сухой (TWI=6,6), с минимальной растительностью (EVI=0,20). Данные характеристики объясняются тем, что южный склон – обрывистый, скалистый участок, который испытывает сильное воздействие солнца и эрозии, в то время как северный склон более мягкий и увлажненный.

Зона южного макросклона низкогорного уровня объединяет в себе кластеры 1, 3 – состоит из двух частей: более высокой (кластер 1) и более низкой (кластер 3). Кластер 3, занимающий большую площадь, является ключевым элементом этой зоны. Он расположен на средней высоте 194 м, имеет средние значения очень пологих склонов (2,8°) и высокий уровень влажности (TWI=9,3). Плотность растительности здесь невысока (EVI=0,25)

Зона предгорных равнин низкогорного ландшафтного уровня – (кластеры 3, 4) визуально формируют единую, обширную и плоскую низменность. Кластер 3 (средние значения высоты 194 м и крутизны 2,8°) – пологие склоны, а кластер 4 (средняя высота 158

м, средняя крутизна $1,9^\circ$) – это почти идеально плоская, очень влажная ($TWI=10,2$) и обильно заросшая ($EVI=0,48$) территория. Высокие показатели вегетационного индекса объясняются активным использованием данных земель под сельскохозяйственные угодья, что отчётливо видно из спутникового снимка.

При сравнении карт, полученных методом кластеризации, с ландшафтной картой Г.Е. Гришанкова выявлено как общее соответствие, так и ряд локальных расхождений границ ландшафтных зон, особенно в западной части региона (рисунок 5.7).

Однако, на совмещенной карте (рисунок 5.7) видно, что контуры зоны северного макросклона среднегорного ландшафтного уровня «наступают» на предгорную зону на карте Г. Е. Гришанкова.

Алгоритм кластеризации объединяет участки с близкими значениями высоты, крутизны и вегетационного индекса EVI . Для выявления причины различий полученных карт методом кластеризации с ландшафтной картой Г. Е. Гришанкова границы кластеров были наложены на спутниковый снимок (рисунок 5.8). На рисунке 5.8 видно, что в западной части наблюдается пространственная однородность растительного покрова: склоны гор и прилегающие предгорные территории характеризуются сходным зелёным тоном, что соответствует близким значениям EVI ($\sim 0.20-0.25$). Поскольку рельеф в этой части Крыма представляет собой постепенный переход от равнины к горам, различия по высоте и крутизне между предгорьями и нижней частью склонов также недостаточно выражены, что привело к объединению этих территорий в один кластер (кластер 1). Это не противоречит ландшафтной сущности территории, а, напротив, подтверждает физическую и оптическую однородность данного участка по современным спутниковым данным.

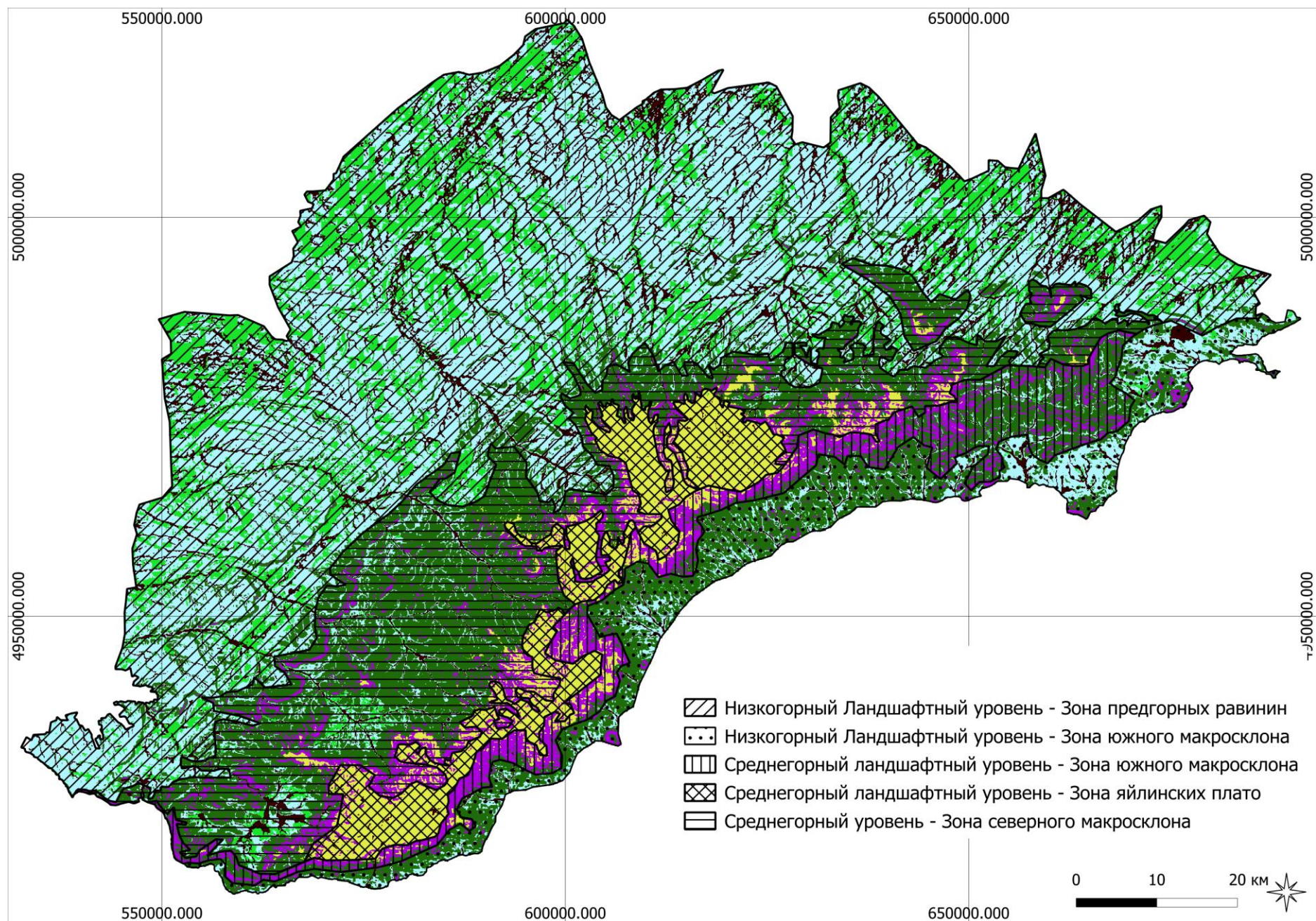
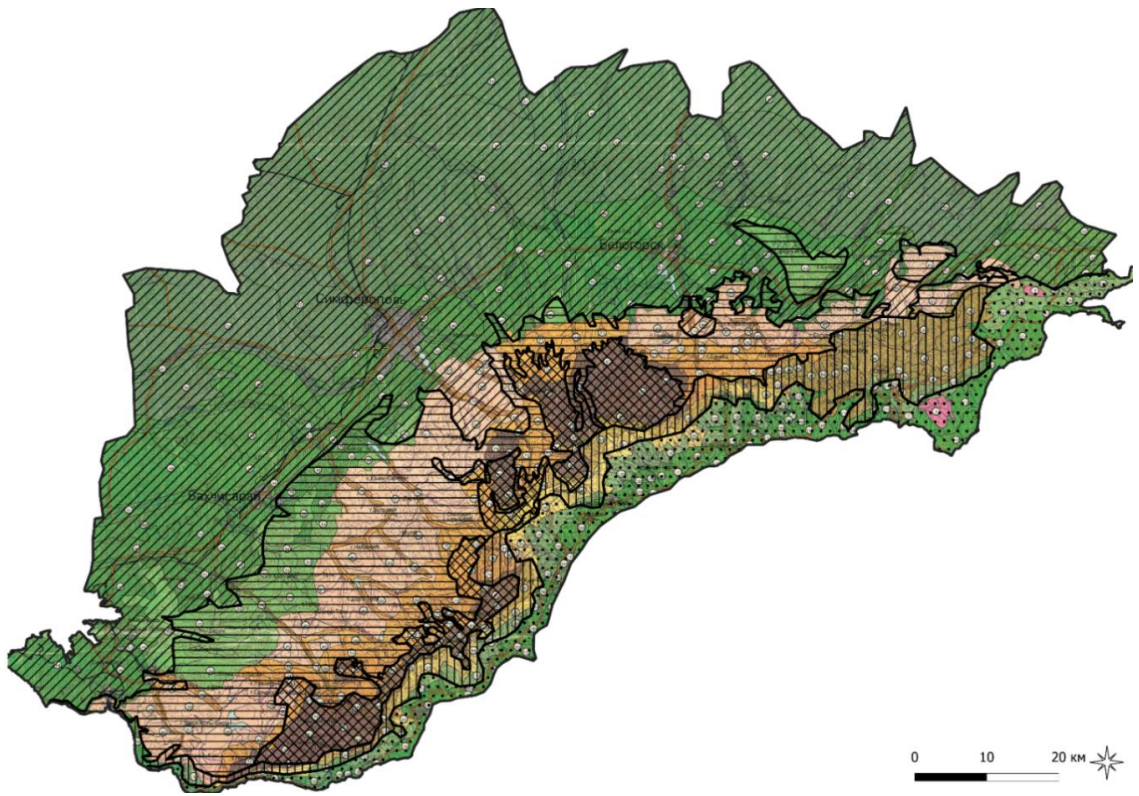


Рисунок 5.6 - Результат кластеризации ($k = 5$), ландшафтные зоны



Условные значения см. рисунок 5.6.

Рисунок 5.7 - Совмещенная ландшафтная карта Г.Е. Гришанкова с границами ландшафтных зон, выделенных в результате кластеризации

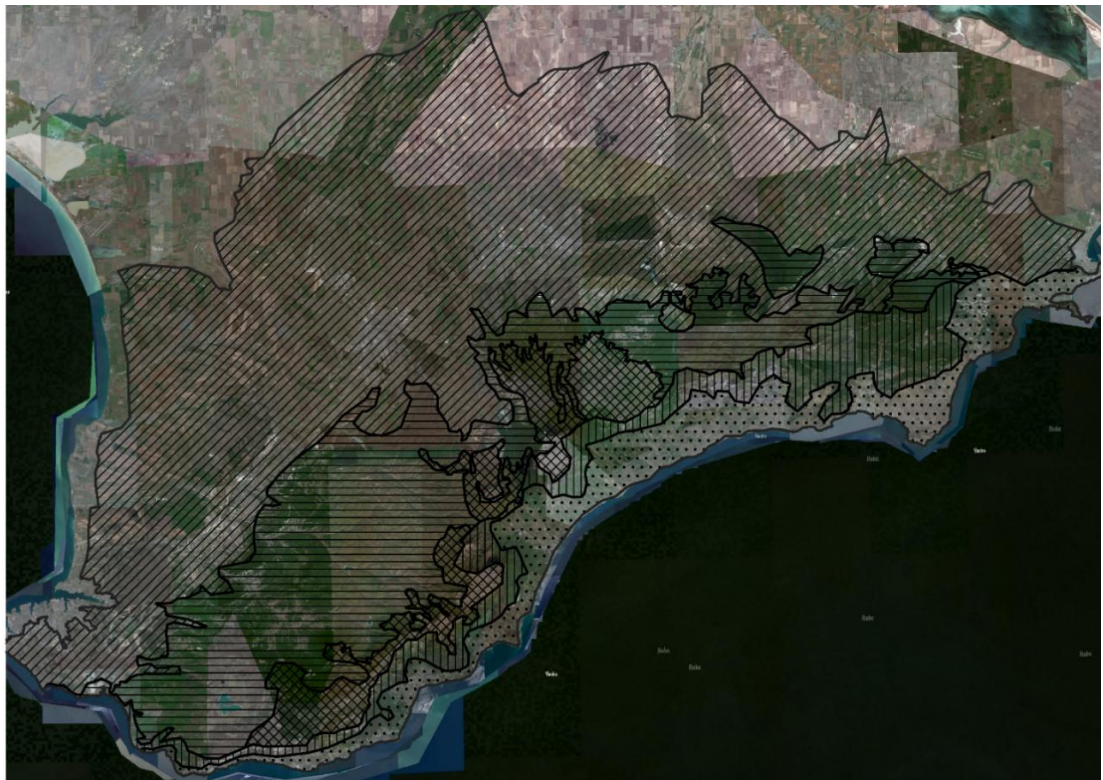


Рисунок 5.8. Совмещенный спутниковый снимок с границами ландшафтных зон, выделенных в результате кластеризации

ЗАДАЧА 6. ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

6.1. УЯЗВИМОСТЬ ЛАНДШАФТОВ К РЕКРЕАЦИОННЫМ НАГРУЗКАМ

Уязвимость ландшафтов Горного Крыма к рекреационным нагрузкам оценивалась с использованием вегетационного индекса EVI, который является индикатором "здоровья" и жизнеспособности растительности. Уязвимость ландшафта – это функция его чувствительности к нагрузке и его способности к восстановлению (устойчивости). Вегетационный индекс EVI и его производные как раз позволяют оценить оба этих компонента.

Методика исследования уязвимых ландшафтов к рекреационным нагрузкам основана на том, что устойчивые экосистемы характеризуются: высокой биопродуктивностью (высокие средние значения EVI), способностью к быстрому восстановлению после сезонных или антропогенных стрессов (высокая скорость весеннего «зеленения»), умеренной сезонной амплитудой EVI, свидетельствующей о стабильности фитомассы в течение года.

Алгоритм анализа включал ниже следующие этапы.

- a. *Расчёт среднегодового значения EVI за 2024 г. по 23 снимкам MODIS, по формуле:*

$$EVI_{\text{mean}} = \frac{1}{23} \sum_{i=1}^{23} EVI_i \quad (6.1)$$

где:

EVI_{mean} – среднегодовое значение EVI

EVI_i – значение индекса EVI на i -м снимке (где $i = 1, 2, \dots, 23$).

23 – количество используемых снимком

Этот показатель отражает общую продуктивность и биомассу растительности. Чем выше значение, тем выше устойчивость к вытаптыванию.

- b. *Оценка скорости весеннего восстановления* — определялась как максимальный прирост EVI за 16-дневные интервалы в период с января по май (дни 1–150 года). Высокие значения прироста свидетельствуют о высоком адаптивном потенциале и способности к быстрому восстановлению после зимнего периода или антропогенного повреждения.
- c. *Расчёт сезонной амплитуды EVI* как разницы между максимальным и минимальным значениями за 2024 г., по формуле:

$$EVI_{\text{amp}} = \max(EVI) - \min(EVI) \quad (6.2)$$

где:

EVI_{amp} – сезонная амплитуда EVI

$\max(EVI)$ – максимальное значение индекса EVI (среди всех 23 снимков)

$\min(EVI)$ – минимальное значение индекса EVI (среди всех 23 снимков)

Высокая амплитуда в сочетании с низким средним EVI может указывать на деградированные или сезонно нестабильные экосистемы, более чувствительные к дополнительным нагрузкам.

- d. *Нормализация всех трёх показателей к диапазону от 0 до 1* методом мин–макс нормализации.
- e. *Разработка формулы интегрированного индекса уязвимости к рекреационной нагрузке.* В нашем исследовании для оценки уязвимости ландшафтов был разработан «интегрированный индекс уязвимости ландшафта» – формула была выведена в результате анализа научной литературы по биофизическим индикаторам устойчивости и уязвимости растительных сообществ к климатическому стрессу, в частности к засухе. Мы исходили из того, что уязвимость экосистем определяется сочетанием чувствительности к возмущениям и ограниченной способности к восстановлению [37]. Определены три ключевых параметра, в качестве надёжных индикаторов уязвимости:

- *средние значения вегетационного индекса EVI за вегетационный сезон* – как интегральный показатель продуктивности и биомассы, обратно связанный с чувствительностью к стрессу [38];
- *сезонная амплитуда вегетационного индекса EVI* – как мера сезонной нестабильности и степени реакции растительности на экстремальные условия [39];
- *скорость весеннего восстановления EVI* – как количественная оценка устойчивости, отражающая способность экосистемы восстанавливаться после зимнего или засушливого периода [40].

Объединив вышеописанные показатели по формуле, получаем интегрированный индекс уязвимости к рекреационной нагрузке:

$$\text{Index}_{\text{уязв}} = (1 - \text{средний EVI}_{\text{норм}}) + (1 - \text{скорость восстановления}_{\text{норм}}) + \text{амплитуда}_{\text{норм}} \quad (6.3)$$

где:

$\text{Index}_{\text{уяз}}$ – интегрированный индекс уязвимости к рекреационной нагрузке

$\text{EVI}_{\text{норм}}$ – нормированное среднегодовое значение EVI

$\text{Скорость восстановления}_{\text{норм}}$ – нормированная скорость весеннего восстановления

$\text{Амплитуда}_{\text{норм}}$ – нормированная сезонная амплитуда EVI

- f. *Разработка карты уязвимости ландшафтов Горного Крыма к рекреационным нагрузкам* путем переклассификации карты интегрированного индекса уязвимости по заданным порогам:

0–1,3 устойчивые

1,3–1,7 слабо уязвимые

1,7–2,0 умеренно уязвимые

2.0 высоко уязвимые.

- g. *Пространственный анализ пересечения туристических маршрутов с картой уязвимости ландшафтов Горного Крыма к рекреационной нагрузке* путём

наложения векторного слоя 114 пеших туристических маршрутов [41] на растровый слой устойчивости ландшафтов.

Используя выше описанную методику, рассчитываем уязвимость ландшафтов Горного Крыма к рекреационным нагрузкам.

Среднегодовое значение вегетационного индекса EVI за 2024 год. С помощью модуля Raster Calculator по формуле $(\text{"evi_1"} + \text{"evi_2"} + \dots + \text{"evi_23"}) / 23$ были рассчитаны среднегодовые значения вегетационного индекса EVI для каждого пикселя и получена карта (рисунок 6.1.1). Диапазон значений EVI составляет от -1 до 1, где для здоровой растительности значения находятся между 0,20 и 0,80. Чем выше значения в EVI – тем ниже уязвимость ландшафта к антропогенным нагрузкам и пожарам.

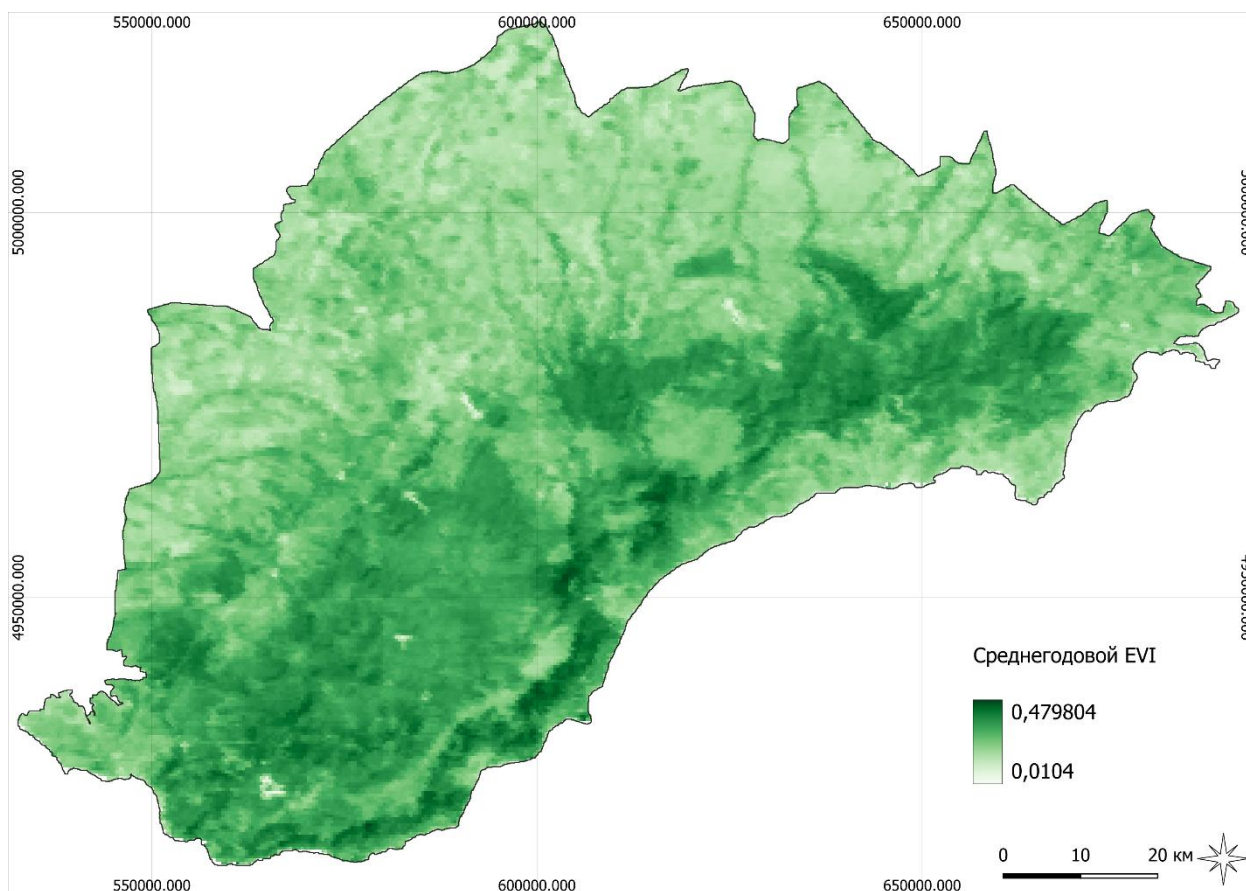


Рисунок 6.1.1 - Распределение среднегодовых значений вегетационного индекса EVI в Горном Крыму за 2024 год

На карте среднегодовых значений EVI за 2024 год для *низкогорного ландшафтного уровня* хорошо видна закономерность: северные и юго-восточные районы Горного Крыма имеют низкие значения вегетационного индекса – около 0,1. На первый взгляд, это может показаться признаком бедной или деградированной растительности. Однако эти значения соответствует естественному состоянию зон, где доминируют: степные сообщества

(типчак, полынь, ковыль), сельскохозяйственные угодья (пашни, сенокосы, виноградники), лесостепные переходные зоны с редкими деревьями и густым травяным покровом, кустарниковые заросли (терновник, боярышник, можжевельник). Данные типы растительности характеризуются:

- низкой высотой;
- разреженным покровом;
- низким содержанием хлорофилла по сравнению с лесами;
- сезонным развитием.

Помимо этого, низкие значения среднегодового вегетационного индекса говорят о том, что растительность здесь не густая, не влажная, а сухая и легковоспламеняющаяся.

Среднегорный ландшафтный уровень отличается более высокими среднегодовыми значениями вегетационного индекса EVI ($>0,2$). Здесь распространена густые, биопродуктивные растительные сообщества, с большей устойчивостью к антропогенным нагрузкам и пожарам.

Скорость весеннего восстановления растительного покрова (прирост значений EVI). Адаптивный потенциал – это способность системы справляться с фактическим или ожидаемым стрессом, в том числе инициировать меры по предотвращению будущего ущерба и/или расширению диапазона условий, к которым она адаптирована [42]. Для оценки скорости восстановления растительности после зимнего периода использован метод максимального прироста EVI, ограниченный временными рамками с января по май с временным интервалом в 16 дней (Дни 1–150). Это позволяет исключить влияние возможных вторичных всплесков активности в тёплые летние месяцы и сфокусироваться на фазе интенсивного весеннего «зеленения». С применением модуля Raster Calculator для каждой пары последовательных снимков (17 января – 2 февраля, 2 февраля – 18 февраля и т.д.) вычислили разницу значений EVI. Из всех полученных значений прироста для каждого пикселя выбиралось максимальное значение, характеризующее наиболее интенсивную фазу весеннего «зеленения» (рисунок 6.1.2).

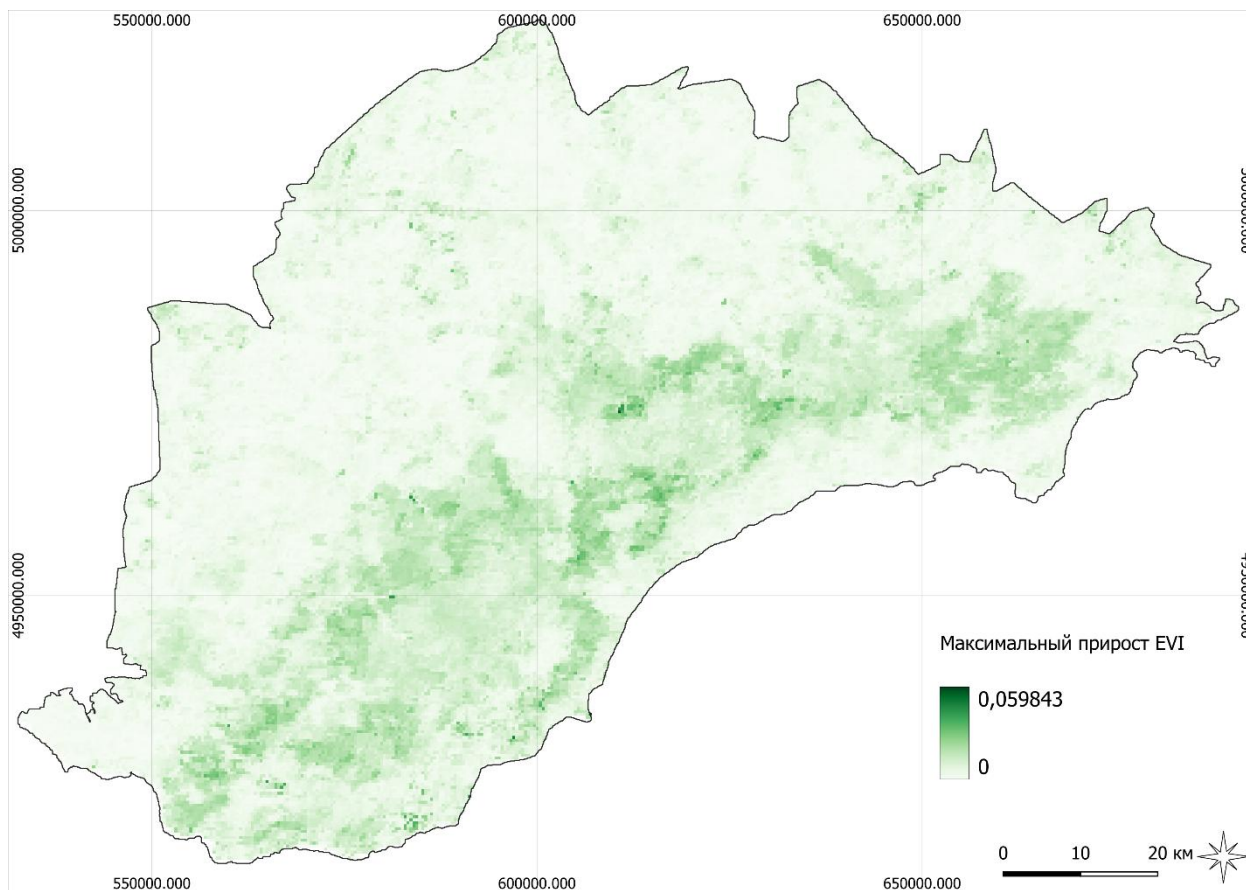


Рисунок 6.1.2 - Максимальный прирост вегетационного индекса EVI в Горном Крыму за период январь-май 2024 года

Чем выше значения прироста вегетационного индекса EVI, тем более динамично развивается растительность весной. Такие территории обладают высоким адаптивным потенциалом: они быстро выходят из зимнего физиологического покоя.

Сезонная амплитуда EVI. Амплитуда вегетационного индекса является индикатором сезонной динамики и стресса у растительности. Разница между максимальным и минимальным значением EVI в течение одного года (2024 г.) для каждого пикселя рассчитывалась с применением инструмента QGIS: *Cell Statistics* → *Statistic = Range* (в Processing Toolbox). Показатель отражает степень сезонной изменчивости растительного покрова: высокие значения характерны для экосистем с резким весенним ростом и летним иссушением (степи, сельхозугодья), что может свидетельствовать о повышенной уязвимости к климатическим стрессам. Низкие значения наблюдаются в устойчивых лесных экосистемах или в деградированных ландшафтах с низкой продуктивностью (рисунок 6.1.3). В сочетании со средними показателями вегетационного индекса EVI амплитуда позволяет дифференцировать стабильные и стрессовые экосистемы.

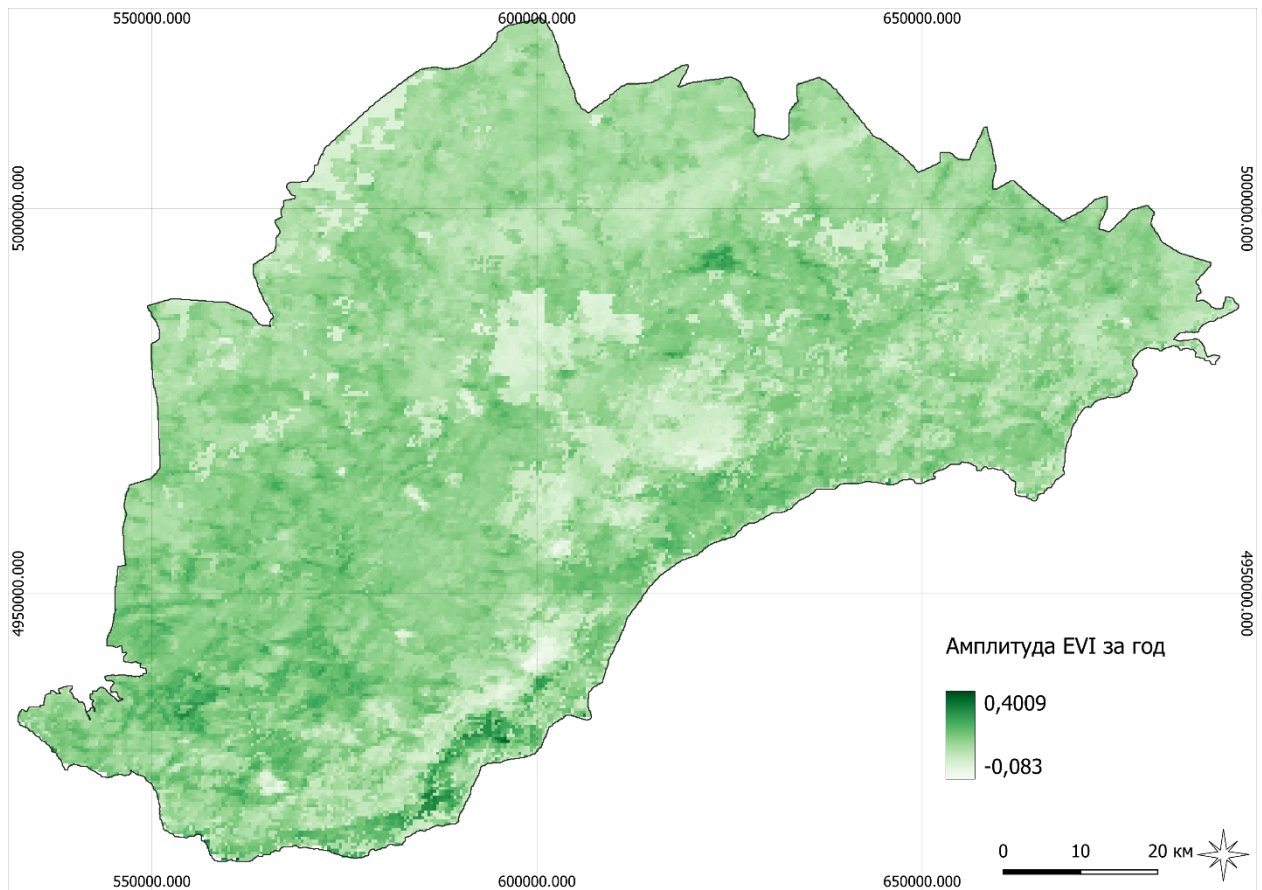


Рис. 6.1.3. Амплитуда вегетационного индекса EVI в Горном Крыму за 2024 год

На карте амплитуды EVI за 2024 год наиболее высокие значения наблюдаются в зонах сосновых и смешанных лесов, включая эрозионное древне-оползневое ступенчато-склоновое низкогорье. Это объясняется тем, что, несмотря на кажущуюся стабильность хвойных насаждений, их вегетационная активность существенно снижается зимой (из-за замедления фотосинтеза и влияния снега), а летом достигает максимума. В отличие от этого, степные и сельскохозяйственные территории характеризуются более низкой амплитудой, поскольку их растительность не способна достичь высоких значений EVI даже в пик сезона, а зимой и летом показатели часто остаются близкими из-за разреженного покрова и влияния почвы. Таким образом, высокая амплитуда индикатор биологической активности растительности и способности к сезонному восстановлению.

Нормализация и разработка карты интегрированного индекса уязвимости ландшафтов. Формула интегрированного индекса уязвимости на основе трёх биофизических показателей, полученных из временных рядов вегетационного индекса EVI приведена в уравнении 6.3. Все три компонента были предварительно нормализованы к диапазону 0 – 1 методом минимакс-нормализации (min-max normalization) по формуле 6.4, чтобы обеспечить сопоставимость шкал [43].

$$X_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (6.4)$$

где:

X_{norm} – нормированное (масштабированное) значение исходной величины x

x – исходное значение показателя в конкретной точке

x_{max} – максимальное значение данного показателя по всему исследуемому региону

x_{min} – минимальное значение данного показателя по всему исследуемому региону

Использование выражения $1 - x$ для первых двух переменных, обусловлено направлением их связи с уязвимостью.

Средняя продуктивность (средний EVI) и скорость восстановления являются благоприятными характеристиками: чем выше их значения, тем менее уязвима экосистема. Однако цель интегрированного индекса – отражать степень уязвимости, то есть: чем выше значение индекса, тем выше уязвимость (рисунок 6.1.4). Чтобы привести «благоприятные» показатели к «неблагоприятной» шкале, их инвертируют с помощью преобразования $1 - X_{norm}$. Таким образом, чтобы все компоненты индекса «смотрели в одну сторону»: чем больше значение – тем выше уязвимость было применено выражение « $1 - \dots$ ». В отличие от них, сезонная амплитуда уже напрямую ассоциируется с экологическим стрессом и нестабильностью: чем она выше, тем выше уязвимость. Поэтому амплитуда включается в индекс без инверсии.

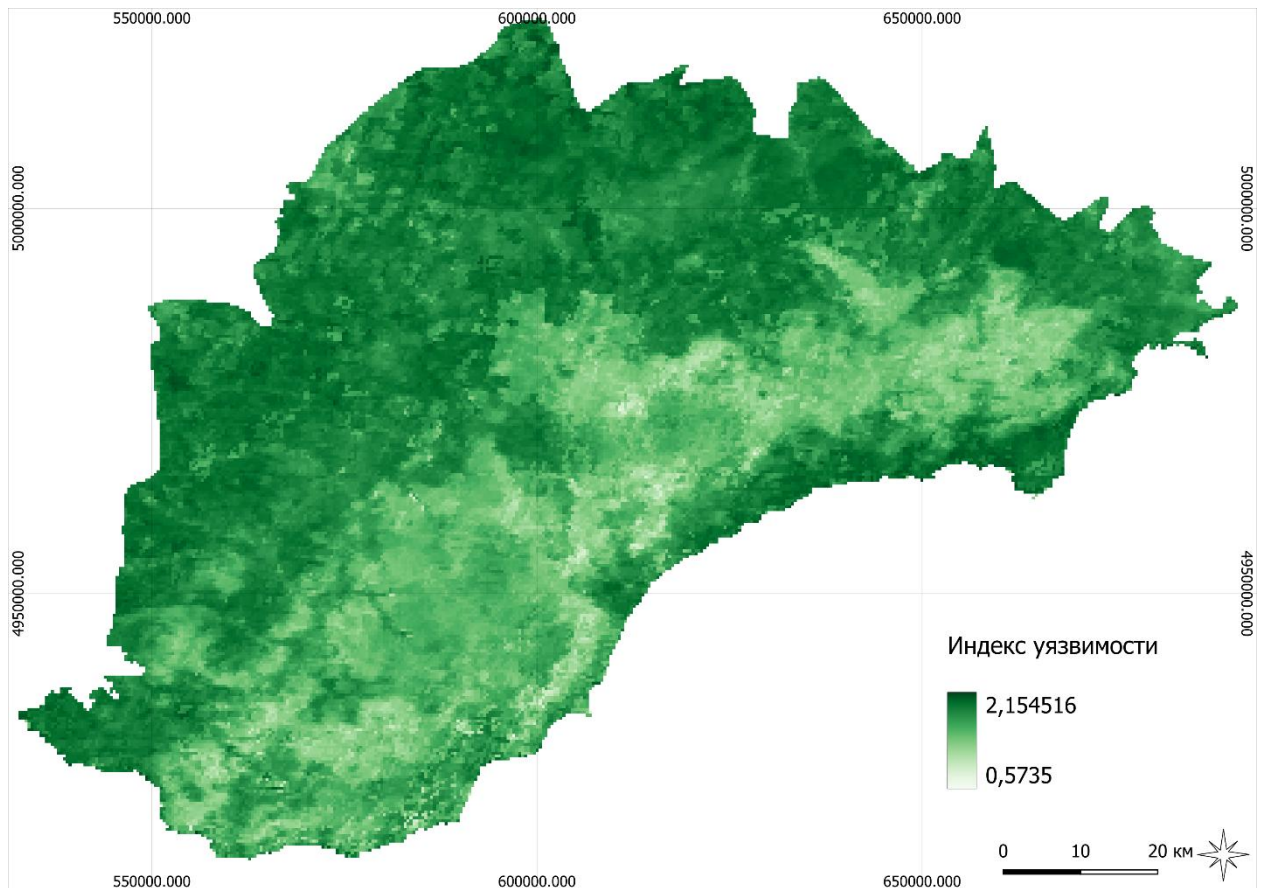


Рисунок 6.1.4 - Интегрированный индекс уязвимости ландшафтов Горного Крыма

Учитывая, что максимально возможное значение индекса уязвимости – 3 (при нормализованных параметрах от 0 до 1). Полученные значения (0,57–2,15) указывают на высокую степень уязвимости ряда территорий. Как упоминалось выше, для лучшего визуального восприятия карта интегрированного индекса уязвимости была переклассифицирована по заданным порогам (рисунок 6.1.5).

Выделим наиболее уязвимые ландшафты для *низкогорного ландшафтного уровня северного макросклона - предгорная зона аккумулятивных, останцово-денудационных и структурных денудационных равнин и кустовых возвышенностей с разнотравными степями, кустарниковыми зарослями, лесостепью и низкорослыми дубовыми лесами).*

В пределах пояса разнотравно-бородачовых и разнотравно-асфоделиновых степей на аккумулятивных и денудационных равнинах наиболее уязвимые:

- структурные наклонные денудационные равнины с разнотравно-бородачевыми и разнотравно-асфоделиновыми (Белогорский район: Зыбинское сельское поселение, Васильевское сельское поселение, Цветочненское сельское поселение, Новожиловское сельское поселение; Нижнегорский район: Дрофинское сельское поселение; Советский район: Красногвардейское сельское поселение);

- денудационно-останцовые и аккумулятивные равнины с ковыльно-типчачовыми степями (Кировский район: Приветненское сельское поселение; Симферопольский район: Новосёловское сельское поселение, Пожарское сельское поселение, Николаевское сельское поселение);
- галечниковые равнины с разнотравными степями (Красногвардейский район: Найдёновское сельское поселение);
- долинно-террасовый с лугами, луговыми степями, лесостепью (Красногвардейский район: Колодезянское сельское поселение Пятихатское сельское поселение).

В пределах пояса лесостепи на денудационно-останцовых, структурных денудационных и аккумулятивных равнинах, кустовых возвышенностях:

- галечниковые равнины с дубовыми лесами, кустарниковыми зарослями типа "дубки" и участками разнотравно-луговых степей (Севастополь: Нахимовский район, Андреевский муниципальный округ).

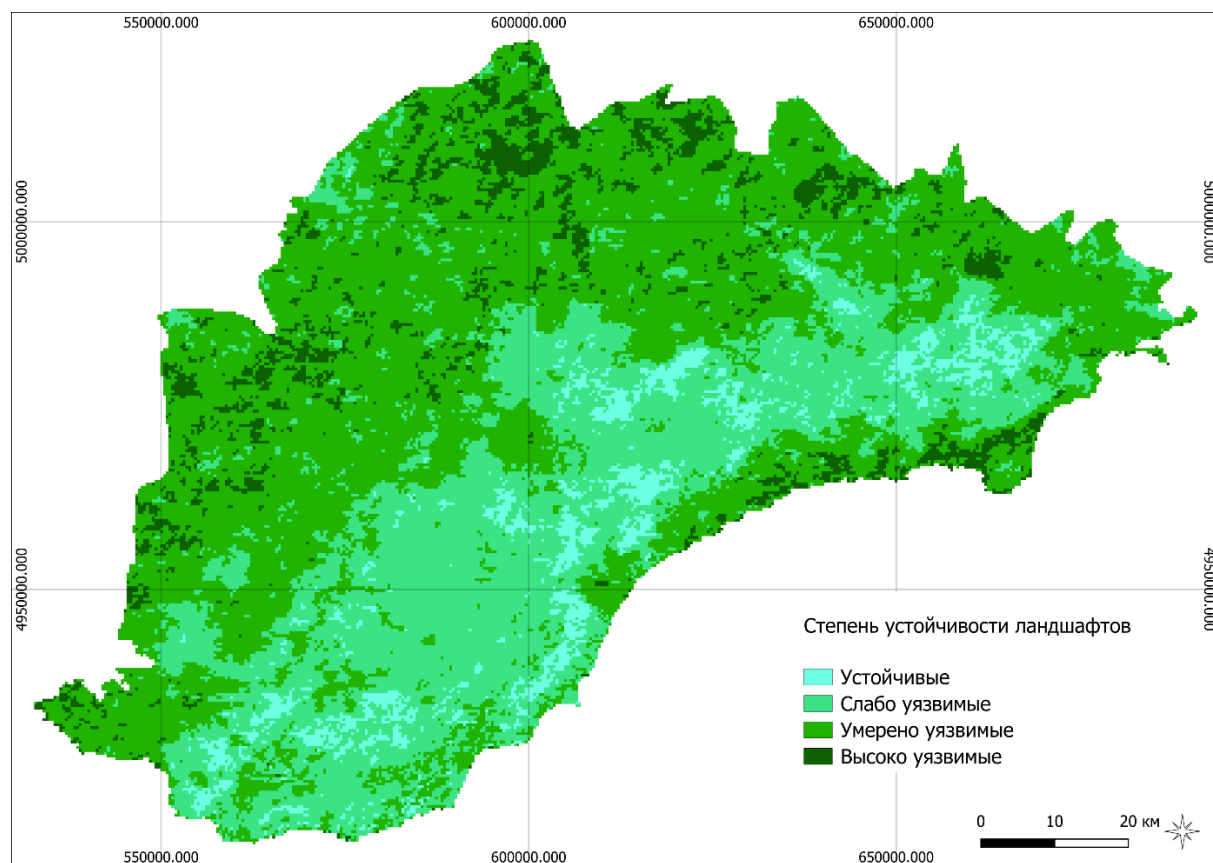


Рисунок 6.1.5 - Степень устойчивости ландшафтов Горного Крыма на основе интегрированного индекса уязвимости ландшафтов

Выделим наиболее уязвимыми ландшафты для *низкогорного ландшафтного уровня южного макросклона* - зона *полусубтропических дубовых, фисташково-дубовых, можжевельно-сосновых лесов и шибляковых зарослей.*

В пределах пояса дубово-фисташковых, можжевельново-сосновых лесов и шибляковых зарослей наиболее уязвимые:

В районе прибрежной зоны муниципального округа Судак:

- ступенчато-склоновое эрозионное низкогорье с широким развитием оползней, с фисташково-дубовыми и дубовыми лесами в комплексе с шибляковыми зарослями и фриганоидными степями;
- эрозионное овражно-балочное низкогорье, с фисташково-дубовыми лесами в комплексе с шибляковыми зарослями и фриганоидными степями;
- эрозионное низкогорье амфитеатров с сосново-можжевельновыми и дубовыми лесами в комплексе с шибляковыми зарослями и фриганоидными степями;
- эрозионное овражно-балочное низкогорье и мелкогорье с шибляковыми зарослями и фриганоидными степями;
- эрозионное овражно-балочное мелкогорье с выходами коренных пород в виде скал с шибляковыми зарослями и фриганоидными степями;
- долинно-террасовый с фисташково-дубовыми и дубовыми лесами в комплексе с шибляковыми зарослями и злаково-разнотравными лугами.

В районе прибрежной зоны муниципального округа Алушта:

- ступенчато-склоновое эрозионное низкогорье с широким развитием оползней, с фисташково-дубовыми и дубовыми лесами в комплексе с шибляковыми зарослями и фриганоидными степями;
- аллювиально-пролювиальные равнины и эрозионное овражно-балочное мелкогорье с фисташково-дубовыми и дубовыми лесами в комплексе с шибляковыми зарослями и фриганоидными степями;
- долинно-террасовый с фисташково-дубовыми и дубовыми лесами в комплексе с шибляковыми зарослями и злаково-разнотравными лугами.

В пределах пояса сосновых, дубовых и смешанных широколиственных лесов и шибляковых зарослей наиболее уязвимы:

В районе прибрежной зоны муниципального округа Алушта:

- эрозионное, овражно-балочное, ступенчато-склоновое низкогорье с дубовыми лесами и шибляковыми зарослями.
- озерно-западинный на абразионно-денудационной равнине, с галофитными лугами в комплексе с полынно-типчаковыми степями (прибрежная зона муниципального округа Судак.)

Анализ пеших туристических маршрутов и их пересечение с уязвимыми ландшафтами. Для оценки потенциального воздействия рекреационной нагрузки на ландшафты Горного Крыма был проведен анализ 114 пешеходных туристических маршрутов, полученных с сайта [41]. Целью анализа было определить, затрагивают ли эти маршруты зоны повышенной уязвимости, выявленные в предыдущем этапе работы. На основе карты уязвимости ландшафтов был проведен визуальный и пространственный анализ пересечения маршрутов с различными классами уязвимости (рисунок 6.1.6).

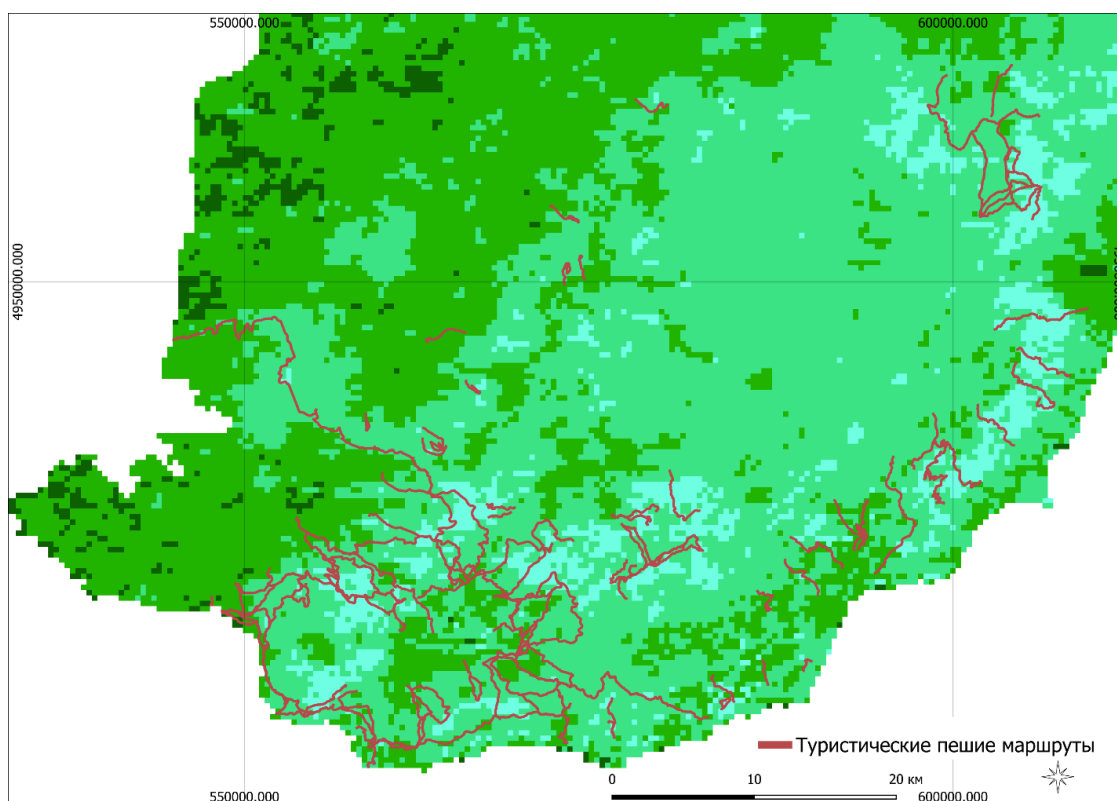


Рисунок 6.1.6 - Пересечение пеших туристических маршрутов с различными классами уязвимости ландшафтов Горного Крыма

Результаты анализа:

- высоко уязвимые ландшафты (темно-зеленый). Незначительная часть маршрутов проходит через зоны высокой уязвимости. Наиболее ярким примером является участок тропы Благодатное – Аязьма – Балаклава, который частично следует по границам или непосредственно по высоко уязвимым территориям. Это указывает на потенциальную угрозу возникновения пожара в этих зонах при неосторожном обращении с огнем туристами;

- умеренно уязвимые ландшафты (насыщено-зеленый). Значительная часть маршрутов (около 35-40%) проходит преимущественно по умеренно уязвимым территориям. К таким маршрутам относятся: Балаклава - мыс Айя по берегу, Балаклава - Караньское плато – Карьер, Часть Ишачьей тропы на нижнее плато Чатыр-Дага, К Бирюзовому озеру под Ай-Петри, Штангеевская тропа, Танковое - Сурень-Тау, Ущелье Уч-Кош, Горный ключ – Любимовка. Эти зоны требуют повышенного внимания со стороны туристов и служб контроля, так как они обладают средним риском возгорания;

- слабо уязвимые ландшафты (светло-зеленый). Подавляющее большинство маршрутов (около 60% и более) пролегают по территориям с низкой степенью уязвимости.

Выявлено, что большинство маршрутов проходят по слабо- и умеренно уязвимым территориям, однако отдельные участки затрагивают высоко уязвимые ландшафты, требующие особого контроля.

6.2. Уязвимость ландшафтов к лесным пожарам

В оценке пожарной опасности ландшафтов особую значимость приобретают два критических фенологических рубежа, выявляемых по временным рядам вегетационного индекса EVI: *момент максимального роста* (сигнализирующий о начале вегетации и снижении горючести) и *момент максимального падения* (указывающий на завершение вегетационного сезона и резкое повышение пожарной нагрузки).

В научном и прикладном контексте дата максимального прироста EVI отражает переход экосистемы от состояния покоя к фазе активного физиологического функционирования: возобновляется фотосинтез, формируется новая биомасса, меняется микроклиматическая среда. Особенно эта информация востребована при оценке и прогнозировании пожарной опасности в ландшафтах, подверженных возгораниям – в том числе в условиях Горного Крыма, где сложные рельефные и климатические условия формируют неоднородную пространственную структуру горючих материалов. До наступления активного роста сухая прошлогодняя растительность (мертвый напочвенный покров, сухостой, сухая трава) обладает высокой горючестью, особенно в условиях ранневесеннего потепления и отсутствия осадков. С началом вегетации, сопровождающимся интенсивным накоплением влаги в наземной биомассе, горючесть ландшафта резко снижается – растительность переходит из категории «потенциального топлива» в категорию «огнезащитного покрова».

В свою очередь, *момент максимального падения EVI* выявляет завершение вегетационного сезона и переход живой растительности в сухой горючий материал. В этот период наблюдается резкое снижение влажности наземной биомассы, что существенно повышает пожарную нагрузку, особенно в условиях засушливого лета и осени. Пространственный анализ этой даты позволяет выявлять зоны раннего высыхания растительности, прогнозировать начало осенне-весеннего пожароопасного периода и планировать профилактические мероприятия – от минерализации полос до временного ограничения доступа на территорию. Совместное использование карт *начала* и *окончания* вегетации даёт возможность формировать *динамическую модель пожарной уязвимости*, учитывающую как снижение, так и нарастание риска в течение года.

Оценка момента наступления вегетационного сезона. Исходя из научной литературы, существует несколько методов для определения момента начала вегетационного сезона на основе анализа сезонной динамики спектральных вегетационных индексов, получаемых по временным рядам данных спутниковых наблюдений [44].

В нашем исследовании мы использовали метод максимума производной основанный на выявлении временного момента наибольшего прироста индекса растительности (EVI – Enhanced Vegetation Index) [45]

Временной ряд включал 23 спутниковых растров EVI за 2024 год (каждые 16 дней), полученных от платформы MODIS [46] с пространственным разрешением 500 м. Все растровые слои приведены к единой проекции EPSG:32636 (WGS 84 / UTM zone 36N).

Для начала была рассчитана разница между ближайшими по дате снимками. Для каждой пары последовательных дат был рассчитан растровый слой разности EVI:

$$\Delta EVI_t = EVI_t - EVI_{t-1} \quad (1),$$

где t – порядковый номер снимка.

Расчёт выполнялся с использованием инструмента Raster Calculator. В результате был получен набор из 22 растров, отражающих изменение EVI между соседними датами наблюдений.

Для каждого пикселя во временном ряде была найдена дата с максимальным положительным значением приращения EVI. Это выполнено в два шага:

Сначала с помощью инструмента Cell Statistics (Processing Toolbox → Raster analysis → Cell statistics) был рассчитан растр «максимальных значений прироста EVI», содержащий максимальное значение прироста EVI за год по каждому пикселю. Затем, путём сравнения значений «максимальных значений прироста EVI» с каждым из растров разностей (рассчитанных по формуле 1), была определена дата, соответствующая этому максимуму.

В результате был получен растр, в котором значение каждого пикселя соответствует дню года, на который приходится максимальный рост EVI – то есть дата начала вегетационного сезона (рисунок 6.2.1). Применение цветовой палитры на итоговом растре позволило выявить пространственные закономерности начала вегетации.

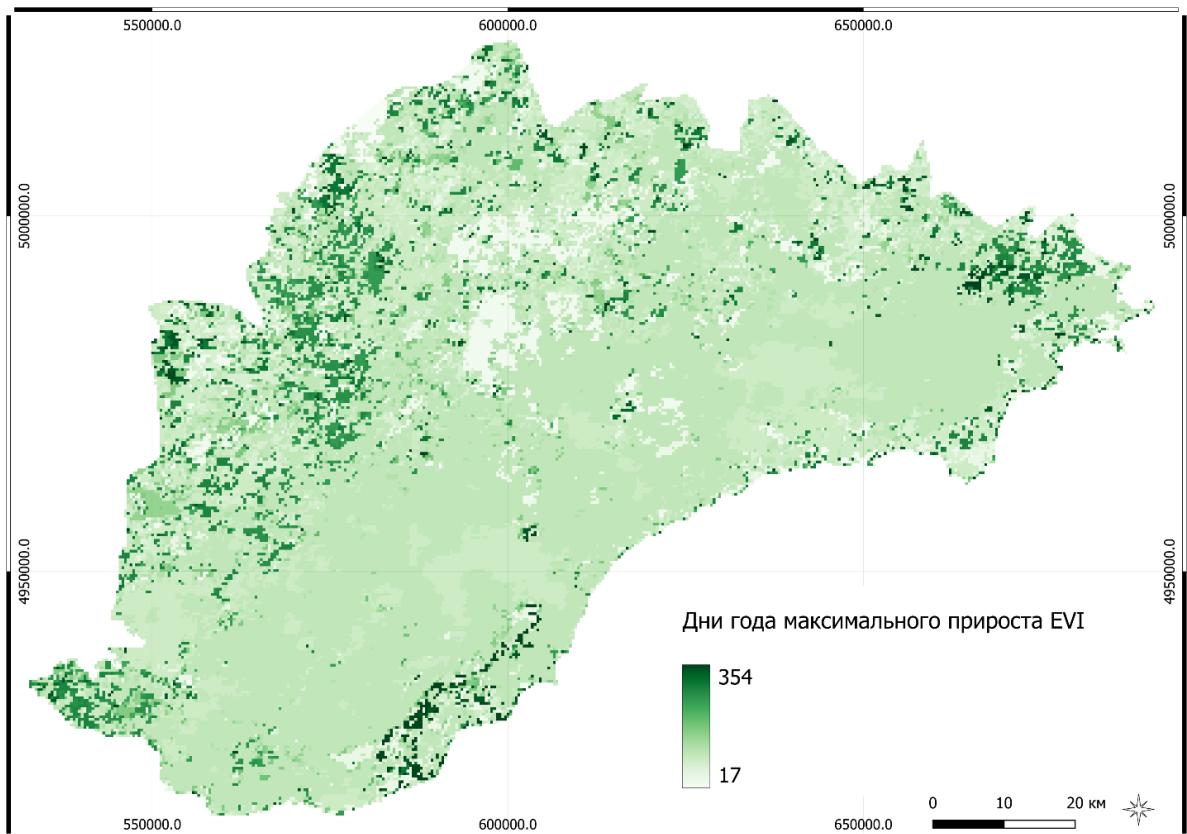


Рисунок 6.2.1 - Период максимального роста вегетации растительного покрова Горного Крыма (по номеру дня в году)

Светло-зелёные и белые участки соответствуют раннему началу вегетации (дни 17–60, январь – март) – характерны для низменных районов, сельскохозяйственных угодий и

побережья.

Тёмно-зелёные участки указывают на позднее начало (дни 200–354, август – декабрь) – наблюдаются в горных районах, лесах, а также в зонах с низкой растительной активностью (вода, города, скалы).

Отчетливо видно, что на карте преобладает светло-зеленый цвет, соответствующий 113 дню – 22 апреля (рисунок 6.2.2), - фаза максимального роста EVI.

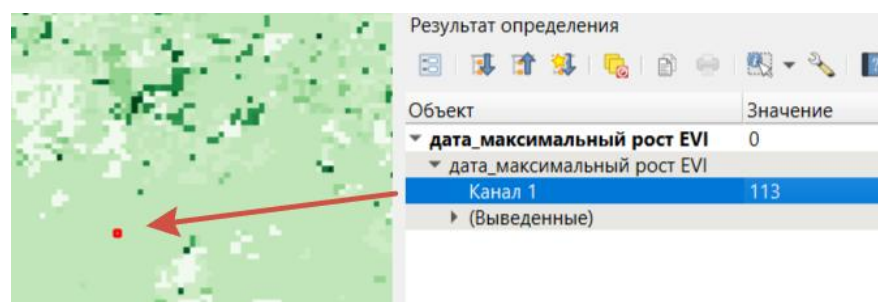


Рисунок 6.2.2 - Определение значения в точке

В рамках данного исследования под «началом вегетационного сезона» мы будем принимать дату достижения максимальной скорости роста растительного покрова.

Оценка момента окончания активной фазы вегетации (максимальное падение значений вегетационного индекса EVI). День максимального падения EVI определялся как дата, соответствующая наиболее резкому снижению индекса в течение 2024 года. Расчеты проводились с использованием инструмента Raster Calculator по временному ряду 23 спутниковых растров EVI за 2024 год (каждые 16 дней), по формуле:

$$\Delta EVI_t = EVI_{t+1} - EVI_t \quad (2)$$

где t – порядковый номер снимка.

В каждом пикселе находился временной шаг с минимальным значением ΔEVI_t (т.е. самым сильным отрицательным изменением). Днём максимального падения считался *день года следующего снимка* ($t + 1$), поскольку именно в этот момент значение EVI достигает нового, пониженного уровня.

В результате расчета создана карта, в которой каждому пикселю присвоен день года (1–366), соответствующий моменту максимального падения EVI (рисунок 6.2.3).

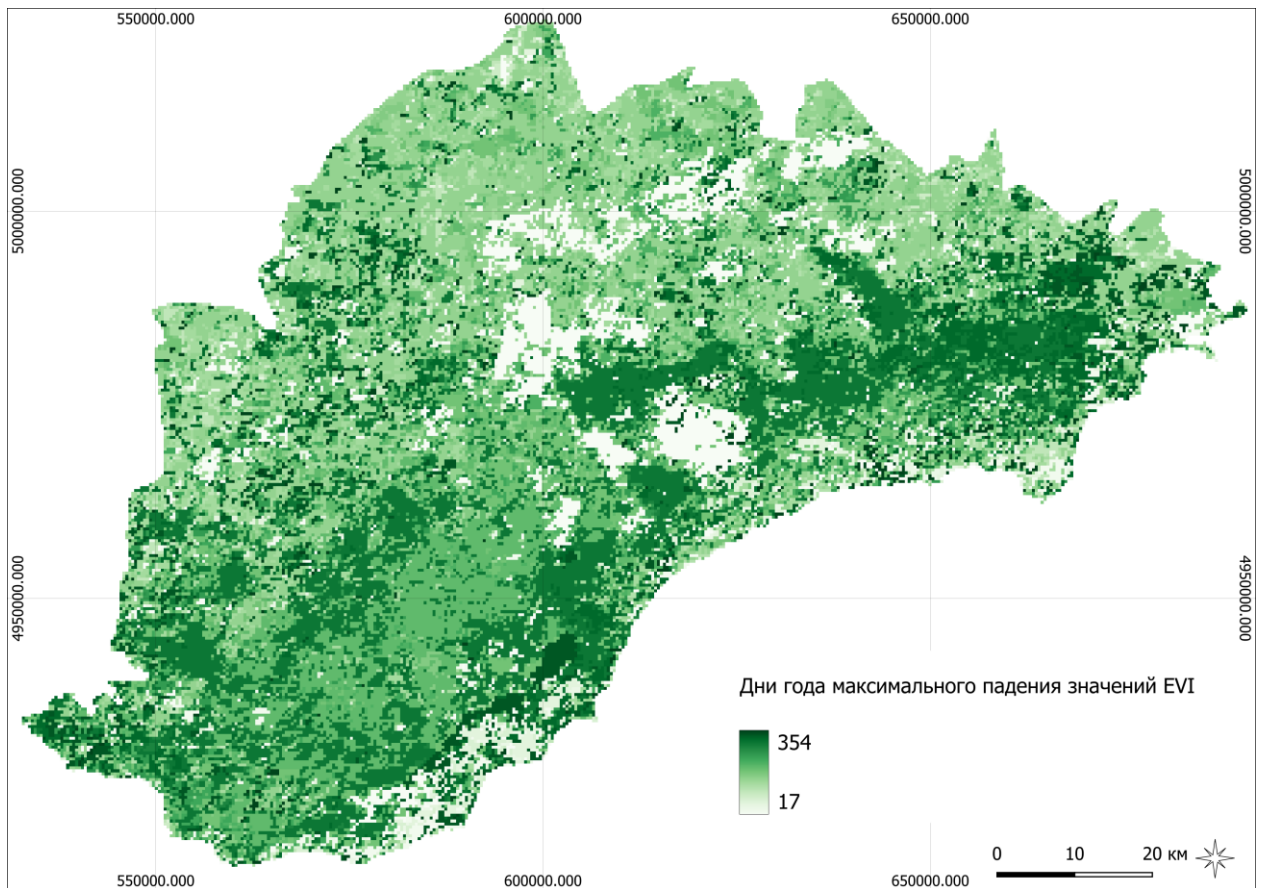


Рисунок 6.2.3 - Период окончания активной фазы вегетации растительного покрова Горного Крыма (по номеру дня в году)

Полученная карта, отражает пространственную неоднородность сроков завершения активной вегетации и начала фазы высыхания растительного покрова на территории Горного Крыма. Светлые участки соответствуют ранним датам падения EVI, а тёмные – поздним, что напрямую связано со степенью пожарной опасности: чем раньше завершается вегетационный период и начинается сухостой, тем выше риск возникновения и распространения природных пожаров.

Наиболее раннее падение EVI зафиксировано в низкогорном ландшафтном уровне, предгорной зоне – здесь оно приходится на 162-й день года (11 июня). На этой территории расположены сельскохозяйственные угодья, сформировавшимися на месте типчаково-ковыльных степей. Раннее высыхание растительного покрова здесь вызвано относительно низким уровнем увлажнения, высокой инсоляцией летом и антропогенной трансформацией естественной растительности, которая привела к доминированию видов с коротким вегетационным циклом. Уже к середине июня растительный покров переходит в фазу сухостоя, создавая благоприятные условия для возгорания и быстрого распространения огня. Эта зона демонстрирует наиболее высокий уровень ландшафтной пожароопасности.

В среднегорной части региона наблюдается чёткая зональная дифференциация. В западных частях среднегорья, где развиты леса из дуба скального с примесью граба и ясеня,

максимальное падение EVI происходит значительно позже – на 210-й день года (29 июля). Это связано с лучшими условиями увлажнения, более прохладным микроклиматом и большей биомассой древесной растительности, которая дольше сохраняет влагу. В то же время восток среднегорья, несмотря на сходный состав древостоя, характеризуются более поздним сроком падения EVI – 307-й день года (3 ноября). Подобное позднее высыхание свидетельствует о высокой устойчивости этих экосистем к засушливым условиям и, как следствие, о низкой пожарной опасности.

Аналогичная картина наблюдается и в лесах из дуба пушистого и их производных формациях, где день максимального падения EVI также приходится на 3 ноября (307-й день). Эти насаждения, как правило, располагаются в наиболее защищённых рельефных условиях – в балках, на затенённых склонах или в зонах повышенного увлажнения, – что обеспечивает длительное сохранение влажности как в кроне, так и в лесной подстилке. В силу этого такие территории практически не подвержены возгораниям и могут выполнять роль естественных противопожарных барьеров.

Таким образом, пространственное распределение сроков максимального падения EVI чётко отражает ландшафтную структуру Горного Крыма и позволяет ранжировать территории по степени пожарной уязвимости. Наиболее критичной в пожарном отношении является низкогорный уровень – предгорная зона (антропогенно преобразованная), тогда как естественные лесные экосистемы среднегорья, особенно на востоке Горного Крыма, демонстрируют высокую устойчивость к высыханию и, соответственно, низкую пожароопасность. Полученные результаты могут служить основой для разработки дифференцированных мер по предупреждению и локализации природных пожаров, а также для оценки долгосрочных изменений в уязвимости ландшафтов в условиях изменения климата.

Помимо пожарной безопасности, информация, заложенная в этих двух фенологических рубежах, находит применение и в других прикладных областях. В *сельском и лесном хозяйстве* она позволяет оптимизировать сроки посева, внесения удобрений, защиты растений от заморозков и планировать лесовосстановительные мероприятия. В *экологическом мониторинге* даты роста и падения EVI служат чувствительными индикаторами климатических изменений и нарушений фенологической синхронности в экосистемах, что особенно актуально для управления ООПТ. В *гидрологии* эти моменты связаны с динамикой снеготаяния, весеннего стока и паводков. В *здравоохранении* – коррелируют с началом и завершением сезонов активности клещей и пыления аллергенных растений. В *коммунальном хозяйстве* – помогают определять границы отопительного сезона и планировать работы по уходу за зелёными насаждениями.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ

Настоящее исследование достигло поставленной цели, разработав целостную иерархическую модель пространственной организации ландшафтов Горного Крыма, в которой рельеф выступает главным системообразующим фактором. Работа подтвердила ключевую гипотезу о том, что адекватный анализ требует рассмотрения рельефа диалектически – одновременно как статического условия (каркаса) и динамического фактора (процесса) – на разных пространственных уровнях.

Основные научные и практические результаты.

1. Подтверждена и развита классическая ландшафтная концепция. На макроуровне разработана и визуализирована трехуровневая модель (уровень → зона → пояс), которая наглядно демонстрирует выраженную вертикальную поясность и резкую асимметрию северного (лесостепного) и южного (субсредиземноморского) макросклонов, а также уникальность ландшафтов Южного берега Крыма.

2. Осуществлён переход от качественного описания к количественному моделированию. На мезоуровне впервые для региона применён количественный показатель Sky View Factor (SVF) для объективного выделения открытых и закрытых склонов, развивающий идеи Г.Е. Гришанкова. Установлена сильная связь SVF с крутизной склона и слабая – с абсолютной высотой, что доказывает преобладающую роль локальной морфометрии. Разработана и опубликована интерактивная веб-карта, интегрирующая данные по SVF, ландшафтным уровням, крутизне и экспозиции.

3. Выявлен доминирующий фактор на локальном уровне. Статистический анализ (ANOVA, множественная регрессия) на ключевом участке предгорья показал, что экспозиция склона является статистически значимым доминирующим фактором, определяющим распределение растительности (по индексу EVI). Влияние крутизны, топографического индекса влажности (TWI) и формы рельефа в условиях данного участка оказалось незначимым.

4. Проведена успешная верификация классических карт цифровыми методами. Кластерный анализ (K-means) по комплексу факторов (высота, крутизна, TWI, EVI) автоматически выделил границы низкогорного и среднегорного ландшафтных уровней, а также основных ландшафтных зон, в целом подтвердив корректность экспертной ландшафтной карты Г.Е. Гришанкова. Расхождения интерпретированы как отражение современной пространственной однородности растительного покрова, что демонстрирует потенциал метода для актуализации ландшафтных схем.

5. Разработаны прикладные инструменты для управления территорией. На основе временных рядов спутниковых данных создан интегральный индекс уязвимости ландшафтов к рекреационным нагрузкам, учитывающий продуктивность (EVI), скорость восстановления и сезонную амплитуду. Составлена соответствующая карта, анализ которой показал, что большинство из 114 проанализированных пеших туристических маршрутов проходят по слабо- и умеренно уязвимым ландшафтам, но некоторые затрагивают высоко уязвимые зоны, требующие контроля.

Заключение

Проведённое исследование подтвердило эффективность предложенного интегративного подхода, сочетающего классические ландшафтные концепции (высотная поясность, катенарные связи) с современными методами

геоинформационного моделирования, дистанционного зондирования и статистического анализа. Это позволило не только систематизировать и детализировать представления об организации ландшафтов Горного Крыма, но и создать основу для их динамического мониторинга и прикладной оценки.

Полученные результаты – иерархическая модель, интерактивная карта, цифровая кластеризация и индекс уязвимости – представляют собой научно-методическую базу для решения задач рационального природопользования, рекреационного планирования, охраны природы и адаптации к изменениям климата в регионе. Дальнейшее развитие проекта может быть связано с детализацией моделей на мезо- и локальном уровнях для ключевых бассейнов, а также с интеграцией климатических и социально-экономических данных для прогнозного моделирования.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

Настоящая работа вносит значительный вклад в современное ландшафтоведение и географию Горного Крыма за счёт следующих принципиально новых положений и результатов:

1. Методологическая новизна: синтез классических и цифровых парадигм. Впервые для Горного Крыма реализован комплексный подход, интегрирующий фундаментальные классические концепции организации горных ландшафтов (высотная поясность, асимметрия склонов, катенарный анализ) с современными методами количественного геоинформационного и статистического анализа. Это позволило перевести качественные описания в плоскость верифицируемых цифровых моделей.

2. Применение новых количественных методов для решения традиционных задач:

- Впервые для региона с целью объективной оценки концепции «открытых/закрытых склонов» (Г.Е. Гришанков) применён и картографирован показатель Sky View Factor (SVF), что позволило заменить качественное описание экспозиции на точный расчёт степени экранирования небосвода.
- Впервые проведена многомерная кластеризация (K-means) всей территории Горного Крыма по комплексу растровых данных (рельеф, увлажнение, растительность), результатом чего стало автоматизированное, объективное выделение границ ландшафтных уровней и зон, служащее цифровой верификацией существующих экспертных карт.

3. Создание новых инструментов и моделей.

- Разработана и внедрена оригинальная интерактивная веб-ГИС, интегрирующая слои SVF, ландшафтных уровней, крутизны и экспозиции, что создаёт публично доступную основу для комплексного пространственного анализа.
- Предложен и апробирован новый интегральный индекс уязвимости ландшафтов к рекреационным нагрузкам, основанный на динамике вегетационного индекса EVI (средняя продуктивность, скорость восстановления, амплитуда). Данный подход является новым для оценки рекреационного потенциала региона.

4. Получение новых научных знаний о факторах организации ландшафтов.
- На макроуровне трехуровневая иерархическая модель (уровень–зона–пояс) получила детальную цифровую и картографическую реализацию, выявившую новые нюансы в пространственной дифференциации.
 - На мезоуровне впервые количественно доказано, что распределение SVF в Горном Крыму в большей степени зависит от локальной крутизны склона, нежели от абсолютной высоты.
 - На локальном уровне методами статистики (ANOVA, регрессия) в условиях предгорья впервые установлено доминирующее влияние экспозиции склона на распределение растительности (EVI) при статистически незначимой роли других геоморфологических факторов (крутизна, TWI, форма), что уточняет представления о ведущих факторах ландшафтной дифференциации данного иерархического уровня.

Таким образом, новизна исследования носит комплексный характер и заключается как в разработке и применении новых для региона методик и инструментов (веб-ГИС, SVF-анализ, кластеризация ландшафтов), так и в получении новых знаний о количественных взаимосвязях между рельефом и растительным покровом на разных уровнях организации ландшафтов Горного Крыма.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

Проведённое исследование вносит существенный вклад в развитие теоретических основ современного ландшафтоведения, горной географии и геоинформатики. Его теоретическая значимость заключается в ниже следующих ключевых аспектах.

1. Развитие методологии комплексного ландшафтного анализа.

Работа служит успешным примером и методологическим образцом интеграции классических ландшафтных концепций и современных цифровых технологий. Она демонстрирует, как теоретические построения (учение о высотной поясности, катенарной организации, асимметрии склонов) могут быть операционализированы, количественно оценены и визуализированы с помощью ГИС-моделирования, дистанционного зондирования и статистики. Это формирует прецедент для перевода качественных географических теорий в формат проверяемых и воспроизводимых цифровых моделей.

2. Углубление и конкретизация концепции рельефа как системообразующего фактора.

Исследование развивает теоретическое положение о рельефе как главном каркасообразующем факторе горных ландшафтов, наполняя его конкретным содержанием для каждого иерархического уровня:

- на макрорегиональном уровне подтверждены выделение ландшафтных уровней и детализирована теория барьерного эффекта и асимметрии макросклонов;
- на мезорегиональном уровне концепция «открытых/закрытых склонов» впервые получила строгое количественное выражение через показатель SVF, что обогащает теорию дифференциации склоновых геосистем;

- на локальном уровне статистически доказано доминирующее влияние экспозиции над другими геоморфологическими параметрами в определённых условиях, что вносит вклад в теорию факторов ландшафтной дифференциации на микроуровне.

3. Верификация и цифровое подтверждение классических ландшафтных схем.

Работа обеспечивает эмпирическую и объективную поддержку существующим теоретическим построениям и картографическим моделям (на примере карты Г.Е. Гришанкова). Применение объективных методов кластерного анализа не только подтвердило общую корректность экспертного подхода, но и позволило теоретически интерпретировать области расхождения как отражение современной динамики растительного покрова. Это укрепляет теоретический базис ландшафтного картографирования.

4. Разработка теоретической основы для новых прикладных моделей.

Предложенная теоретическая модель оценки уязвимости ландшафтов, основанная на связи устойчивости с динамическими характеристиками растительного покрова (продуктивность, скорость восстановления, амплитуда), представляет собой новый концептуальный подход. Она переносит теоретические представления об устойчивости/уязвимости геосистем из качественной плоскости в количественную, открывая путь для создания прогнозных моделей.

5. Расширение теоретического инструментария ландшафтной экологии.

В исследовании разработан и апробирован новый тип картографической продукции – многослойная интерактивная веб-карта ландшафтно-топографической дифференциации. Её создание представляет собой развитие теории картографического моделирования в эпоху цифровых технологий, предлагая новый формат для представления комплексных географических взаимосвязей.

Таким образом, теоретическая значимость работы заключается в синтезе, развитии и цифровой верификации фундаментальных географических концепций применительно к горным территориям, а также в предложении новых теоретических моделей и инструментов, обогащающих методологический арсенал современной физической географии и ландшафтоведения.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

Результаты исследования имеют непосредственное практическое применение для рационального природопользования, территориального планирования и охраны окружающей среды в Горном Крыму. Практическая значимость заключается в следующем:

1. Для органов управления и охраны природы:

а. Карта уязвимости ландшафтов служит научной основой для:

- разработки и корректировки схем территориального планирования и генеральных планов населённых пунктов;
- оптимизации сети особо охраняемых природных территорий (ООПТ), выделения буферных зон и зон с особым режимом использования;
- планирования противопожарных мероприятий (определение сроков особого противопожарного режима, размещение минерализованных полос, маршрутов патрулирования);

- оценки рисков и планирования мер по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного характера (эрозия, оползни, паводки).

б. Для развития рекреации и туризма результаты наложения туристических маршрутов на карту уязвимости позволяют:

- оптимизировать существующую сеть пеших маршрутов - регламентировать нагрузку, переносить или закрывать участки, проходящие по высоко уязвимым ландшафтам;
- проектировать новые экологические тропы с минимальным ущербом для экосистем;
- разрабатывать рекомендации для туристов и туроператоров по поведению в различных типах ландшафтов;
- интерактивная веб-карта может стать основой для создания публичного навигационно-информационного ресурса для туристов, краеведов и гидов.

3. Для сельского и лесного хозяйства:

а. Детальные модели ландшафтной дифференциации (особенно на мезо- и локальном уровнях) могут быть использованы для:

- почвенно-мелиоративного и агроэкологического районирования;
- выбора оптимальных культур и методов землепользования с учётом экспозиции, крутизны и увлажнённости склонов;
- планирования противоэрозионных мероприятий и лесовосстановления.

4. Для образовательного процесса и науки:

а. Созданный комплекс картографических материалов и интерактивная веб-ГИС может служить учебно-методическим ресурсом для вузов (география, экология, туризм);

б. Разработанные методики (расчёт и применение SVF, построение интегрального индекса уязвимости, кластерный анализ ландшафтов) могут быть тиражированы и применены для изучения других горных регионов России и мира.

5. Ключевые готовые продукты:

а. Интерактивная веб-карта ландшафтно-топографической дифференциации – инструмент для комплексного пространственного анализа, доступный широкому кругу заинтересованных лиц;

б. Набор цифровых тематических слоёв и карт (SVF, уязвимость, кластеры), которые могут быть интегрированы в региональные и муниципальные Геоинформационные системы (ГИС) для поддержки принятия управленческих решений.

Таким образом, работа обеспечивает переход от фундаментального знания к конкретным инструментам и рекомендациям, имеющим ценность для устойчивого развития Горного Крыма, снижения антропогенной нагрузки на экосистемы и сохранения их уникального биоразнообразия.

Список литературы

1. Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. — М.: Высшая школа, 1991. — 366 с.
2. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. — Новосибирск: Наука, 1978. — 317 с.
3. Глушков В.Г. Географо-гидрологический метод // Вопросы теории и методы гидрологических исследований. М., 1961. С. 70–76.
4. Львович М. И. Человек и воды: Преобразование водного баланса и речного стока. — Москва : Географгиз, 1963. — 568 с.
5. Дьяконов К. Н. Геофизика ландшафта : биоэнергетика, модели, проблемы : учеб. издание / К. Н. Дьяконов ; ред. Т. Н. Мартыненко ; техн. ред. Г. Д. Колоскова ; корр. Т. П. Березина. — М. : Изд-во Моск. ун-та, 1991. — 96 с.
6. Позаченюк, Е. А. Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий: монография / Е. А. Позаченюк; науч. ред. Е. А. Позаченюк. — Симферополь: Бизнес-Информ, 2009. — 611 с.
7. Мерченко А. К. Ландшафтная структура и рекреационная оценка территории Горного Крыма // Вестник Крымского федерального университета. Серия: География — Симферополь, 2016. — № 2. — С. 45–58.
8. Муратов М.В. Краткий очерк геологического строения Крымского полуострова / Муратов М.В. — М.: Госгеолгиздат, 1960. — 218 с.
9. Вахрушев Б.А. Эволюция карстовых ландшафтов Горного Крыма / Вахрушев Б.А., Мирошниченко И.А. // Ученые записки ТНУ, 2008. - С. 16-22.
10. Вахрушева Л.П. Использование количественного состава экобиоморф для классификации степных и галофитных ценозов Крыма : автореф. дис. на соискание научн. степени канд. биол. наук / Вахрушева Л.П. - М., 1985. — 16 с.
11. Вахрушева Л.П. Особенности антропогенной динамики степных фитоценозов Крымского Присивашья / Вахрушева Л.П. // Культура народов Причерноморья. — Симферополь : ТНУ, 2001. — С. 12-16.
12. Важов В. И. Агроклиматическое районирование Крыма / В. И. Важов // Труды Никитского ботанического сада. — Ялта, 1977. — С. 5–64.
13. Драган Н.А. Почвы Крыма : [учебное пособие] / Драган Н.А. — Симферополь : СГУ, 1983. — 95 с.
14. Вульф Е.В. Растительность восточных Яйл Крыма, их мелиорация и хозяйственное использование / Вульф Е.В. — М. : Новая деревня, 1925. — 166 с.
15. Львова Е.В. Равнинный Крым. Геологическое строение, гидрогеология, охрана природы / Львова Е.В. — К. : Наукова думка, 1987. — 188 с.

16. Гришанков Г.Е. Проблема целостности в ландшафтоведении / Гришанков Г.Е. // Научные записки Воронежского отделения Геогр. о-ва СССР. – Воронеж, 1974. – С. 10-15.
17. Гришанков Г.Е. Парагенетическая система природных зон (на примере Крыма) / Гришанков Г.Е. // Вопросы географии. - М. : Мысль, 1977. – Вып. 104. – С. 128-139.
18. Гришанков Г.Е. Компоненты ландшафта и ландшафтообразующие факторы / Гришанков Г.Е., Мильков Ф.Н. // Изв. Всесоюзн. Геогр. о-ва. – 1987. - № 6. С. 485–492.
19. Ена В. Г. Заповедные ландшафты Крыма. – Симферополь: Таврия, 1983. – 128 с.
20. Позаченюк Е.А. Дискретность ландшафтообразующих потоков и их роль в формировании геокомплексов / Позаченюк Е.А. // Методологические проблемы современной географии. – К. : Наукова думка, 1993. – С. 52-58.
21. Позаченюк Е. А. Ландшафтное разнообразие Крыма // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2015. №4. – С. 39–48.
22. Подгородецкий П.Д. Крым: Природа / Подгородецкий П.Д. – Симферополь: Таврия, 1988. – 192 с.
23. Позаченюк, Е. А. Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий: монография / Е. А. Позаченюк; науч. ред. Е. А. Позаченюк. – Симферополь: Бизнес-Информ, 2009. – 611 с.
24. Гришанков Г. Е. Ландшафтные уровни материков и географическая зональность // Известия АН СССР. Серия: География. — 1972. — № 4. — С. 3–18.
25. Драган Н.А. Почвенные ресурсы Крыма : [научная монография] / Драган Н.А. – Симферополь : Доля, 2004. – 208 с.
26. Мильков Ф. Н. Учение о ландшафте и географическая зональность. – Воронеж: Издательство ВГУ, 1986. – 224 с.
27. Арманд Д.Л. Наука о ландшафте (Основы теории и логико-мат. методы) / Д.Л. Арманд. — Москва : Мысль, 1975. — 287 с.
28. Hartwell K., Leduc T. T4SU: analyses et représentations des vues du ciel, du soleil et des saillances paysagères dans le contexte d'un outil de CAO // Atelier session démonstration – Conférence Spatial Analysis and Geomatics – SAGEO 2016 / eds. S. Bimonte, T. Devogele, A. Hassan. — Nice, France, 2016. — P. 7.
29. Гвоздецкий Н. А. Физическая география СССР. Европейская часть. — М.: Учпедгиз, 1957. — 568 с.], [Преображенский В. С. Ландшафтные исследования. – М.: Наука, 1966. – 131 с.
30. Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment. 2002. Vol. 83(1–2). С. 195-213.

31. Pushkin A.A., Sidelnik N.Y., Kovalevskiy S.V. Assessment of the potential of using the spectral vegetation index EVI for interpretation of forest stands based on satellite imagery // Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 1: Forestry, Environmental Management and Renewable Resources Processing. 2020. № 1 (228). pp. 49–56.], [Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spectral properties of vegetation and vegetation indices // Geomatics. 2009. № 3. pp. 28–32.
32. Grigoryev A.A., Kondratyev K.Y. Space-Based Methods for Studying the Natural Environment. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988. 163 p.], [Hengl T., Reuter H.I. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Elsevier, 2009. - 772 pp.
33. Global Visualization Viewer (GloVis) / U.S. Geological Survey (USGS) [Электронный ресурс]. - URL: <https://glovis.usgs.gov/> (дата обращения: 16.09.2025).
34. Koshel S., Mikhalyov O. New Approaches in Cartographic Relief Representation with Morphometric Variables // Proceedings of the 26th International Cartographic Conference. 2013. August. pp. 743–744.
35. Вуколов, Эдуард Александрович. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL: учебное пособие / Э. А. Вуколов. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва: Форум, 2008. - 463 с.
36. Миков, С. И. Вегетационные индексы. Основы, формулы, практическое использование / С. И. Миков ; науч. рук.: В. В. Старовойтов, О. А. Бояршинова // Цифровые технологии и бизнес [Электронный ресурс] : материалы 79-ой студенческой научно-технической конференции, Минск, 17 мая 2023 г. / сост. М. Г. Карасёва. – Минск: БНТУ, 2023. – С. 34-42.
37. IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Н.-О. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.). — Cambridge: Cambridge University Press, 2022. — 3056 p.
38. Pricope N. G., Binford M. W., Southworth J. et al. The climate–land degradation–resilience nexus in semi-arid West Africa: An integrated approach // Land Degradation & Development. — 2013. — Vol. 24, № 6. — P. 604–616.
39. de Beurs K. M., Henebry G. M. Spatio-temporal statistical methods for modeling land surface phenology // Phenology: An Integrative Environmental Science / ed. by M. D. Schwartz. — Dordrecht: Springer, 2005. — P. 175–194.
40. Verbesselt J., Hyndman R., Zeileis A., Culvenor D. Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series // Remote Sensing of Environment. — 2010. — Vol. 114, № 12. — P. 2970–2980.
41. Интернет-журнал о самостоятельных путешествиях по Крыму [Электронный ресурс]. — URL: <https://crimeamountain.ru/> (дата обращения: 29.12.2025).

42. Brooks N. et al. The interplay between climate change, vulnerability and adaptation // Global Environmental Change. — 2005. — Vol. 15, № 2. — P. 161–169.
43. Нормализация данных (Data normalization) [Электронный ресурс]. — URL: [https://wiki.loginom.ru/articles/Нормализация%20данных%20\(Data%20normalization\).%20Loginom%20Wiki.pdf](https://wiki.loginom.ru/articles/Нормализация%20данных%20(Data%20normalization).%20Loginom%20Wiki.pdf) (дата обращения: 02.11.2025).
44. Возможности оценки момента наступления вегетационного сезона на основе спутниковых и метеорологических данных / М. А. Медведева, С. А. Барталев, Е. А. Лупян [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2008. — Т. 5, № 2. — С. 313-321.
45. Reed B., Brown J. Issues in characterizing phenology from satellite observations // Use of earthobservation data for phonological monitoring. 2003 Vol. EUR 20675 EN. P. 23 – 26.
46. AppEEARS — Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples [Электронный ресурс]. — URL: <https://appears.earthdata.nasa.gov/> (дата обращения: 10.11.2025).

5. Все планируемые работы выполнены полностью: "Да".

6. Перечень публикаций научных статей в специализированных изданиях, программ и тезисов конференций по результатам выполненного проекта.

Вахрушев Б.А., Кутикова Е.В. Роль геоморфологических факторов в формировании пространственной структуры ландшафтов локального уровня на примере горного Крыма // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. — 2025. — Т. 11, № 3. — С. 68-79.

Кутикова Е.В. Сезонная динамика растительного покрова ландшафтов юго-западной части Горного Крыма на основе вегетационного индекса EVI / Материалы конференции III научно-практическая конференция студентов и молодых учёных «наука Крыма: от истоков к современности» информационное письмо. 17-19 декабря 2025 г. Симферополь.

7. В отчетном периоде не возникли исключительные права на результаты интеллектуальной деятельности, созданные при выполнении проекта: "Нет"

8. Информация о представлении достигнутых научных результатов на научных мероприятиях (конференциях, семинарах и пр., в том числе форма представления – приглашенный доклад, устное выступление, стендовый доклад).

Кутикова Е.В. Сезонная динамика растительного покрова ландшафтов юго-западной части Горного Крыма на основе вегетационного индекса EVI / III научно-практическая конференция студентов и молодых учёных «наука Крыма: от истоков к современности» информационное письмо. 17-19 декабря 2025 г. Симферополь.

9. Информация (при наличии) о публикациях в СМИ, посвященных результатам выполнения научного проекта: «Нет».

10. Привлекались ли к реализации проекта ученые, добровольцы (волонтеры) и иные специалисты: "Нет".

11. Информация о внедрении результатов научного проекта в практическую деятельность: "Нет".

12. Расходование средств обладателей грантов Государственного Совета Республики Крым молодым ученым Республики Крым имени Н. Я. Данилевского:

#№	Направления расходования средств гранта	Сумма расходов (тыс. руб.)
	Оплата труда исполнителя	175
	Приобретение программного обеспечения и лицензий (продление лицензий на специализированное ПО (ENVI, статистические пакеты), приобретение облачных сервисов для обработки спутниковых данных или хостинга веб-карты, подписку на уроки работы в программе Qgis).	35
	Организационные и технические расходы (затраты на полевые выезды для верификации данных (транспорт, ГСМ), мелкое оборудование (карты памяти, внешние жёсткие диски), услуги веб-хостинга для интерактивной карты).	50
	Накладные расходы	40

Е.В. Кутикова