

methodological limitations, and case studies on monitoring fish, invertebrate, and microbial communities are discussed. The study highlights the potential integration of eDNA technologies into ecological monitoring and conservation systems.

Keywords: environmental DNA, ecological DNA, ecosystem monitoring, biodiversity, metabarcoding, aquatic ecosystems.

Маълумот дар бораи муаллиф: Шарифов Саид Аҳмадовиҷ – Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи АМИТ, шӯъбаи Идорақунии заҳираҳои об ва обсафакунӣ, ходими калони илмӣ. Почтаи электронӣ: sharipovsa1988@gmail.com; Ҳомидов Солеҳ Каримовиҷ – Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи Академияи миллӣ илмҳои Тоҷикистон, шӯъбаи идорақунии заҳираҳои об ва обсафанаамоӣ, ходими илмӣ, Тел: (+992) 907100128, E-mail: homid3610@gmail.com; Эшонқуловна Заррина Убайдуллоевна-ходими илмии лабораторияи иншооти гидротехникии Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи Академияи миллӣ илмҳои Тоҷикистон.

Сведения об авторах: Шарипов Саид Аҳмадовиҷ - Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, Отдел управления водными ресурсами и водосбережения, старший научный сотрудник. E-mail: sharipovsa1988@gmail.com; Ҳомидов Солеҳ Каримовиҷ – Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, отдел управления водными ресурсами и водопользования, научный сотрудник, Тел: (+992) 907100128, E-mail: homid3610@gmail.com; Эшонқуловна Заррина Убайдуллоевна- научный сотрудник лаборатории гидротехнических сооружений Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана.

Information about the authors: Sharipov Said Ahmadovich - Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Department of Water Resources Management and Water Conservation, Senior Researcher. E-mail: sharipovsa1988@gmail.com; Khomidov Solekhjon Karimovich - Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan, researcher at the the Department of Water Resources Management and Water Use, Phone: +992 907100128, E-mail: homid3610@gmail.com; Eshankulova Zarina Ubaydullaevna - Researcher, Laboratory of Hydraulic Structure, Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology, National Academy of Sciences of Tajikistan.

УДК 528.94

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОЦЕНКА ДЕГРАДАЦИИ ПОЧВ В БАССЕЙНЕ РЕКИ КАФИРНИГАН ПО ИНДЕКСУ BSI (2000–2024)

Хикматуллозода Н.Х.¹, Гулаҳмадзода А.А.^{1,*}, Иноятова К.Л.¹, Курбон Н.Б.¹

¹Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана

*Автор-корреспондент. E-mail: agulakhmadov@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты исследований по оценке деградации почвенного покрова бассейна реки Кафирниган на основе индекса оголённой почвы (Bare Soil Index, BSI), рассчитанного по данным спутников *Landsat* и *Sentinel* за 2000, 2010, 2020 и 2024 гг. На основе созданных карт пространственного распределения BSI, выполнен сезонный анализ показателей оголения и риска деградации. Установлено выраженное пространственное различие: горная северная часть бассейна характеризуется низким уровнем оголения почв, тогда как южные и предгорные территории демонстрируют высокие значения BSI, связанные с интенсивным землепользованием и эрозионными процессами. Сезонная динамика выявила ключевой период уязвимости — лето, когда площадь оголённых почв достигает ~545 км², а зоны риска увеличиваются более чем вдвое по сравнению с весной и зимой. Индекс обжига также достигает максимума в летние месяцы, отразив усиление пожароопасных процессов. Анализ данных за 2020–2024 гг. показал резкий рост выжженных территорий (до 1190 км² в 2021 г.) с последующим снижением и частичным восстановлением, что свидетельствует о высокой межгодовой изменчивости пожарной опасности. Полученные результаты подтверждают необходимость постоянного мониторинга и разработки адаптивных мер по предотвращению эрозии и пожаров в бассейне реки Кафирниган.

Ключевые слова: Bare Soil Index (BSI), деградация земель, сезонная динамика, индекс обжига (Burn Severity Index), бассейн реки Кафирниган.

Введение

Изучение оголённой почвы и начальных стадий деградации земель важно для экологии и водных ресурсов, позволяющее выявлять участки с повышенной эрозионной активностью и сниженной водоудерживающей способностью почв, способствующая предотвращению потери растительного покрова, уменьшения поверхностного стока и заиливания водоёмов, а также обеспечивающая основу для проведения превентивных мер по устойчивому управлению экосистемами и водными ресурсами, особенно в аридных и полупустынных регионах.

Индекс оголённой почвы (BSI) является важным показателем для региональных исследований, так как эффективно выявляет участки с оголённой почвой и начальные стадии деградации земель, которые могут не фиксироваться одними только вегетационными индексами. Выделяя пространственную изменчивость ландшафтов, BSI способствует точному масштабному картированию процессов опустынивания и эрозии. Интеграция BSI с другими индексами и моделями позволяет региональным органам приоритизировать меры вмешательства, для реализации и реализовывать целевые стратегии управления земельными ресурсами, что делает его незаменимым инструментом в борьбе с деградацией земель на региональном уровне. В 2020 году в Сариска Тайгер Резерв (Индия) уровни органического углерода в почве (SOC) были оценены с использованием значений NDVI, полученных со спутника Sentinel-2A [1]. Для анализа взаимосвязей с другими биофизическими параметрами применялся индекс оголённой почвы (BSI), который показал отрицательную корреляцию с SOC, что свидетельствует о том, что участки с оголённой почвой имеют более низкое содержание органического углерода. В то же время NDVI и pH почвы были положительно коррелированы с SOC, указывая

на более высокое качество и плодородие почвы в местах с высокой концентрацией органического вещества [1].

В данном исследовании [2] в городских районах индекс оголённых почв (BSI) применялся совместно с NDBI и SAVI для выявления изменений землепользования, включая новые застройки, с использованием спутниковых данных Sentinel-2 MSI и Sentinel-1 SAR в платформе Google Earth Engine. Метод с BSI позволил выявлять участки оголённой почвы, повышая точность обнаружения изменений. Подход обеспечил ~90% точности для новых зданий и ~80% для всех классов, что подтверждает эффективность BSI для мониторинга городского расширения. В исследовании [3], проведённом в Минангкабау, Панчаяте, Ваянад, Керала, Индия, индекс оголённых почв (BSI) использовался вместе с индексом нормализованной разницы вегетации (NDVI) для оценки содержания органического углерода почвы (SOC) на основе спутниковых данных Landsat 8 OLI. Была разработана многопараметрическая регрессионная модель для связи SOC с BSI и NDVI, что позволило построить карту пространственного распределения SOC на территории исследования. Предсказанные значения SOC были проверены с помощью полевых измерений, что показало, что BSI в сочетании с NDVI является эффективным инструментом для оценки SOC и плодородия почвы.

В исследовании по картированию городских территорий в Ханое, Вьетнам авторы Ту Ха и др. [4] использовали данные спутника Sentinel-2, полученные в сухой сезон (точная дата не указана), для расчета четырех спектральных индексов: Normalized Difference Tillage Index (NDTI), Bare Soil Index (BSI), Dry Bare Soil Index (DBSI) и Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Были протестированы две комбинации индексов: NDTI/BSI/NDVI и NDTI/DBSI/NDVI, при этом определение городских территорий вы-

полнялось с использованием алгоритма K-means для неконтролируемой классификации. Результаты показали, что BSI превзошел DBSI, обеспечивая лучшую дифференциацию типов оголенных почв и процессов их накопления. Применение комбинации NDTI/BSI/NDVI повысило общую точность картирования на 5,82% и увеличило коэффициент Каппа на 11,1%, что демонстрирует высокую эффективность BSI для картирования городских территорий и потенциал для улучшенного управления городским развитием в сухой сезон. В недавнем исследовании [5], проведённом на двух орошаемых полях площадью 60 гектаров в Северном Судане, индекс оголенных почв (Bare Soil Index, BSI) был применён с использованием спутниковых данных Sentinel-2 для оценки засолённости почв и содержания карбоната кальция (CaCO_3). Геопривязанные почвенные пробы, собранные в 72 точках с глубины 0–15 см, были проанализированы в лаборатории на электропроводность (EC) и CaCO_3 , после чего результаты сопоставлены с показателями, полученными по спутниковым индексам. Регрессионный анализ показал, что BSI имеет значимую корреляцию с электропроводностью почвы ($R^2 = 0,63$, RMSE = 6,42%) и содержанием CaCO_3 ($R^2 = 0,45$, RMSE = 1,29%), а его использование совместно с индексом нормализованной разности засолённости (NDSI) повышает точность прогнозирования CaCO_3 ($R^2 = 0,53$, RMSE = 1,55%). Полученные результаты подтверждают, что BSI, наряду с другими индексами, является эффективным инструментом мониторинга засолённости и содержания CaCO_3 в орошаемых агросистемах и имеет высокий потенциал для управления деградацией почв в засушливых регионах.

В исследовании по мониторингу карстовой пустынности в южных районах Китая [6] с помощью Sentinel-2 MSI ин-

декс оголённых почв (BSI) применялся совместно с красными краевыми индексами. Модель BSI-NDre1 показала наибольшую точность ($R^2 = 95,1\%$, RMSE = 0,872), эффективно выявив зоны сильной пустынности в юго-восточных и центральных частях региона. Это подтверждает высокую эффективность сочетания BSI с красными краевыми индексами для оценки карстовой пустынности. В городе Чифэн, Китай, индекс оголённых почв (BSI) совместно с NDVI и MBSI использовался для выделения эндемиков почвы при картировании плотности лесного полога (FCC) с Landsat 8 и Sentinel-2 [7]. Метод с BSI и DPM позволил построить точные карты FCC с высокой плотностью в западных горах. Верификация показала надёжность метода (Landsat 8: $R^2 = 0,6$; Sentinel-2: $R^2 = 0,81$), подтверждая эффективность BSI для масштабного картирования FCC.

В Самарской области (Россия) Чинилин и др. [8] в своем исследовании использовали индекс оголённой почвы (BSI) для идентификации участков с открытой почвой. Данные спутников Landsat 4–5, 7 (1988–2010) и Landsat 8–9 (2012–2023) позволили построить синтетические изображения оголённой почвы и провести классификацию почв на основе 71 точки отбора проб. Применение BSI совместно с NDVI и NBR2 обеспечило высокую точность прогнозирования почвенных классов (85% точности, коэффициент Каппа 0,67), позволив выделить агрокернозёмы и агрозёмы. Полученные результаты способствуют устойчивому землепользованию, включая профилактику эрозии и оптимизацию использования земель. Рахимов и др. [9, 10] исследовали солонцеватости почв в Майском районе Казахстана исследователи применили индекс оголённой почвы (BSI) вместе с индексами растительности и влажности, включая NDVI, NDWI и SAVI, для оценки состояния почв и растительности. BSI оказал-

ся эффективным для выявления оголённых или экспонированных почв, тогда как NDVI и SAVI давали информацию о здоровье растительности, а NDWI — о содержании влаги в растениях. Комбинированное использование этих индексов позволило провести комплексный анализ солонцеватости почв и состояния растительности, что способствовало лучшему пониманию процессов деградации почв и разработке стратегий устойчивого управления земельными ресурсами в засушливых и полузасушливых регионах. Такой подход демонстрирует ценность интеграции нескольких индексов дистанционного зондирования для мониторинга и управления состоянием почв и растительности в уязвимых сельскохозяйственных ландшафтах.

В исследовании Не и др. [11] индекс голой почвы (BSI), а также индексы Bare-soil (BI) и Dry Bare Soil (DBSI) были применены в Ганьцзы Тибетском автономном округе и Урумчи, Китай для извлечения и картирования открытой земли в сложных городских и природных ландшафтах. BSI использовался в качестве эталонного индекса для оценки эффективности нового Индекса извлечения открытой земли (BLEI). Анализ показал, что BLEI превзошел BSI и другие индексы, достигнув общей точности 98,91%, коэффициента Каппа 0,97 и F1-меры 97,89%. Исследование продемонстрировало, что хотя BSI эффективно идентифицировал открытую почву, BLEI обеспечивал более высокую точность и лучшее различие открытой земли от городских территорий и песчаных почв, предоставляя надежную поддержку для планирования землепользования, исследований почв и экологического управления. Jaksibaev и др. [12] использовали Индекс оголённой почвы (BSI) для оценки оголённости почв и деградации пастбищ в районах плато Устюрт и дельты Амударьи около Аральского моря. BSI в сочетании с NDVI, NDWI, MNDWI, ин-

дексом солёности и температурой поверхности земли позволил выявить участки с низкой растительностью, высокой солёностью и повышенной температурой почвы. Результаты показали устойчивое оголение почвы в деградированных районах, особенно там, где водоснабжение было ограничено, в то время как участки с достаточной водой сохраняли более развитый растительный покров. BSI обеспечил прямую оценку уязвимости земель, что позволяет разрабатывать меры по управлению и устойчивому использованию пастбищ в аридных регионах.

Berdiyev и др. [13] использовали Индекс оголённой почвы (BSI) в качестве одного из шести ключевых показателей для оценки процессов опустынивания в Туркменистане. На основе данных Sentinel 2, обработанных с помощью платформы Google Earth Engine (GEE), BSI был интегрирован вместе с NDVI, SAVI, NDMI, EVI и температурой поверхности земли (LST) в машинные модели (Random Forest, XGBoost, Наивный Байес, KNN). Результаты показали, что северные, центральные и восточные регионы Туркменистана подвергаются сильному опустыниванию, при этом BSI эффективно выделял участки с оголением почвы и снижением растительного покрова. Среди моделей наивысшую точность продемонстрировали Random Forest и XGBoost (96–96,33 %), что подтверждает значимость BSI для мониторинга уязвимости почв в аридных районах. Водосборный бассейн реки Кафирниган (Южный Таджикистан) играет важную экологическую роль, обеспечивая водные ресурсы для сельского хозяйства, населённых пунктов (в том числе Душанбе) и экосистем Центральной Азии. Однако здесь наблюдается выраженная деградация почв и растительности – последствия изменения климата и интенсивной хозяйственной деятельности. Подобные условия приводят к оголению почв, опустыниванию и риску лесных пожаров,

что отрицательно сказывается на устойчивости экосистем. Дистанционное зондирование Земли позволяет отслеживать эти процессы. В частности, Индекс оголённой почвы (BSI, Bare Soil Index) выявляет участки с открытым грунтом.

В отличие от других исследований, проведённых в Индии, Китае, Вьетнаме и России, наше исследование в бассейне реки Кафирниган (Южный Таджикистан) имеет несколько отличительных особенностей и преимуществ. Во-первых, оно охватывает уникальные аридные и полупаридные условия с изменением климата: повышение температуры на 1,2 °С и снижение осадков на 15–20 % за последние 30 лет. Во-вторых, анализ проводится на долгосрочном временном ряду (2000–2024 гг.), что позволяет отслеживать динамику оголённых почв, сезонность деградационных процессов и зоны риска пожаров. В-третьих, интеграция BSI с другими методами позволяет выявлять не только участки оголённых почв, но и оценивать последствия для водных ресурсов, эрозии, риска лесных пожаров и деградации экосистем. Эти особенности обеспечивают научную основу для приоритизации мер по устойчивому управлению земельными и водными ресурсами, что делает наш подход уникальным и практически применимым для регионального планирования.

Целью исследования является оценка динамики оголённых почв и начальных стадий деградации земель в бассейне реки Кафирниган в Таджикистане за 2000–2024 гг. с использованием индекса оголённых почв (BSI) и спутниковых данных. Исследование

включает анализ пространственно-временной динамики BSI, выявление зон эрозии, опустынивания и риска лесных пожаров, а также сопоставление с климатическими и экологическими параметрами для разработки рекомендаций по устойчивому управлению земельными и водными ресурсами.

Данные и методология

Для оценки оголённости почв в бассейне реки Кафирниган использован Bare Soil Index (BSI) – индекс, разработанный для выявления участков с открытым грунтом и минимальным растительным покровом. BSI рассчитывается на основе сочетания отражательной способности в ближнем инфракрасном (NIR), красном, синем и коротковолновом инфракрасном (SWIR1) диапазонах спутниковых снимков. Он эффективно выделяет оголённые почвы даже в условиях частичного покрытия растительностью и используется в различных экологических и агроэкологических исследованиях для мониторинга деградации земель, эрозионной активности, засолённости и урбанизации [14]. Применение BSI позволяет выявлять пространственную изменчивость оголённых участков и интегрировать эти данные с другими индексами растительности (например, NDVI, SAVI) для комплексного анализа состояния экосистем и планирования мероприятий по устойчивому управлению земельными ресурсами. В общих чертах он вычисляется как и характеризует наличие голой почвы: более высокие значения BSI соответствуют открытым (не покрытым растительностью) участкам.

$$(BSI = \frac{(SWIR1 + Red) + (NIR + Blue)}{(SWIR1 + Red) - (NIR + Blue)}) \quad 1)$$

На основе данных многоспектральных спутников (Landsat/Sentinel) для годов 2000, 2010, 2020 и 2024 построена карта пространственного распределения BSI по

бассейну (рис. 1). Значения BSI классифицированы на пять категорий: крайне высокое оголение (0.42–0.50), очень высокое (0.34–0.42), высокое (0.26–0.34), среднее

(0.18–0.26) и низкое (0.10–0.18) (см. легенду на рис. 1).

Для сезонного анализа использовались агрегированные показатели по четырём сезонам (зима, весна, лето, осень). Рассчитаны: площадь оголённой почвы (км^2) в каждом сезоне, площадь зон риска (сильного оголения/пустошей), средний «индекс обжига» (Burn Severity Index, BSI) и суммарная площадь выжженных

участков в летние месяцы по годам. Термин «зоны риска» соответствует участкам с повышенным BSI (например, средний и выше по классификации). Индекс обжига демонстрирует степень повреждения растительности (например, по разнице светоотражения до и после пожара).

Результаты

Карта BSI по классам

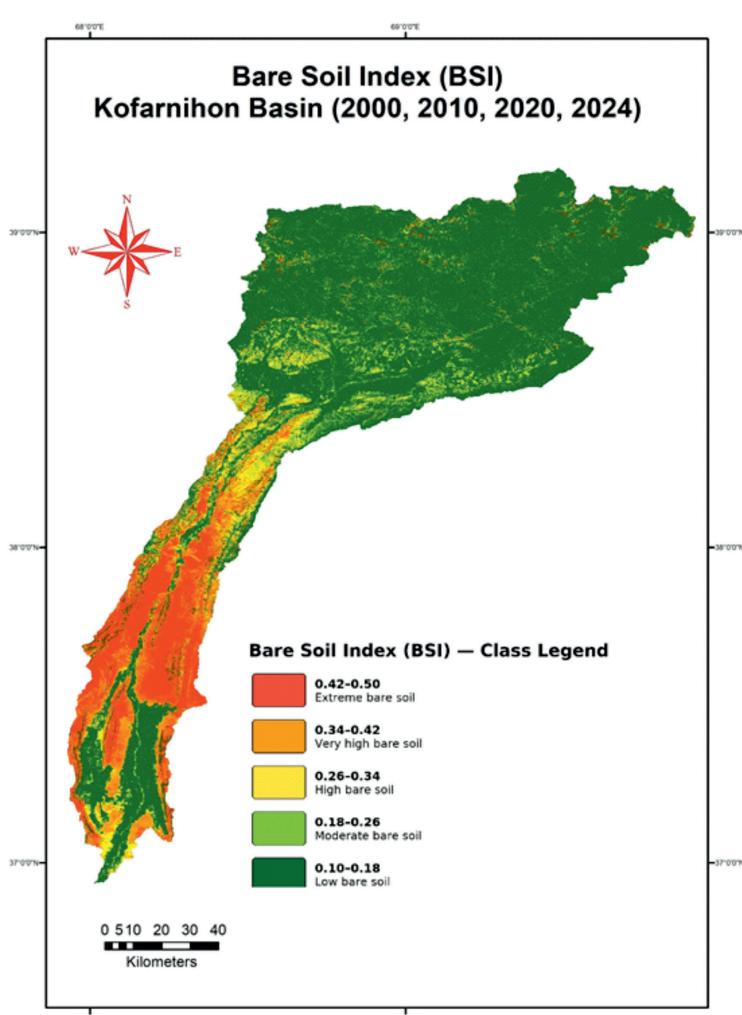


Рисунок 1. Пространственное распределение индекса оголённой почвы (BSI) в бассейне р. Кафирниган (данные за 2000, 2010, 2020, 2024 гг.).

Цветовая палитра: красный – «крайне высокое оголение», оранжевый – «очень высокое», жёлтый – «высокое», салатовый – «среднее», зелёный – «низкое» оголение.

Карта (рис. 1) показывает явный кон-

траст между северной и южной частями бассейна. Горная северная зона остаётся преимущественно зелёной (низкий BSI), что указывает на сохранность растительного покрова и минимальное оголение. В низовьях и предгорьях (юго-запад бассей-

на) отмечаются жёлтые–красные пятна, т.е. «высокие» и «очень высокие» уровни оголённых почв. Это говорит об активном земельном использовании (пашни, пастбища, усыхание водных объектов) и эрозии, проявляющихся на большом про-

странстве. Границы зон с разной степенью оголения чётко прослеживаются по перепадам рельефа: крутые склоны и осушённые равнины демонстрируют более экстремальные значения BSI.

Сезонный анализ

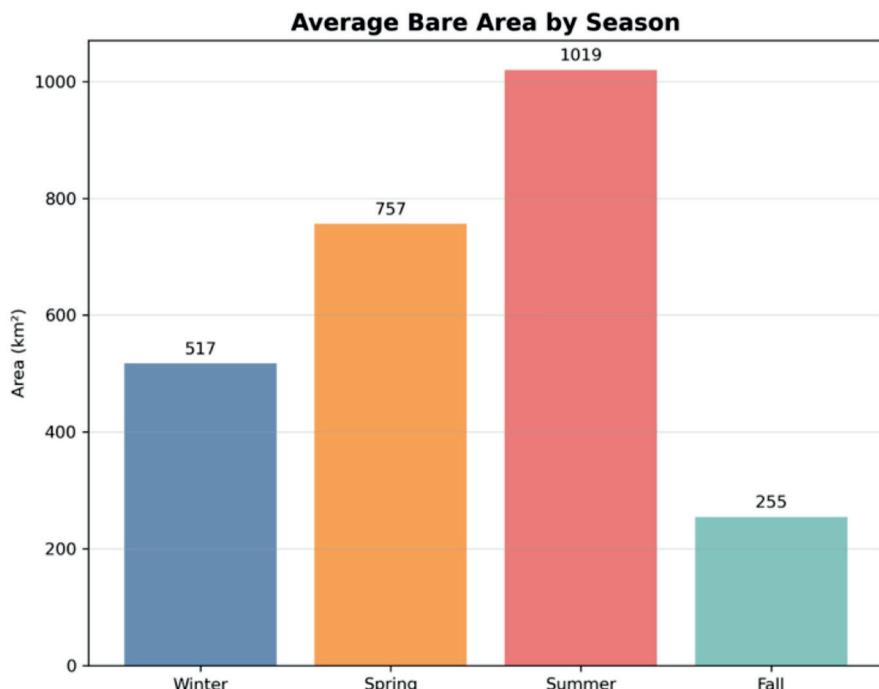


Рисунок 2. Сезонная динамика показателей деградации почв в бассейне р. Кафирниган.

Левая верхняя диаграмма – средняя площадь оголённой почвы (км^2) по сезонам; правая верхняя – площадь зон риска; левая нижняя – средний индекс обжига; правая нижняя – тренд выжжёных (горящих) участков летом по годам (выражено в км^2 *Bare Area* – полностью выжжёные, Risk Area – участки с сильным повреждением).

На диаграммах (рис. 2) отчётливо прослеживается пик всех показателей в летний период. Средняя площадь оголения летом ($\sim 545 \text{ км}^2$) почти вдвое превышает показатель весной ($\sim 390 \text{ км}^2$) и более чем вдвое – зимой ($\sim 277 \text{ км}^2$). Осень характеризуется минимальным значением ($\sim 121 \text{ км}^2$). Аналогично, площадь зон риска максимальна летом ($\sim 226 \text{ км}^2$), значительно ниже весной ($\sim 108 \text{ км}^2$) и зимой ($\sim 92 \text{ км}^2$),

и почти отсутствует осенью ($\sim 20 \text{ км}^2$). Средний индекс обжига также достигает максимума летом ($\sim 0,0295$) и минимален осенью ($\sim 0,016$), что свидетельствует о наиболее сильных пожароопасных процессах в тёплый период.

Особенно резко заметна динамика выжжёных площадей: до 2010 г. горения практически не регистрировалось, а в 2020 и 2024 гг. появилось массовое выгорание участка бассейна (рис. 2, правый нижний график). Летние Bare Area в 2020 г. достигли $\sim 1072 \text{ км}^2$ (зона полного выжжённого грунта), Risk Area – $\sim 450 \text{ км}^2$. В 2024 г. цифры лишь немного снизились (~ 1020 и $\sim 440 \text{ км}^2$ соответственно). Это отражает сильное усиление пожароопасности и линейный тренд (наклон графика) роста выжжёных территорий.

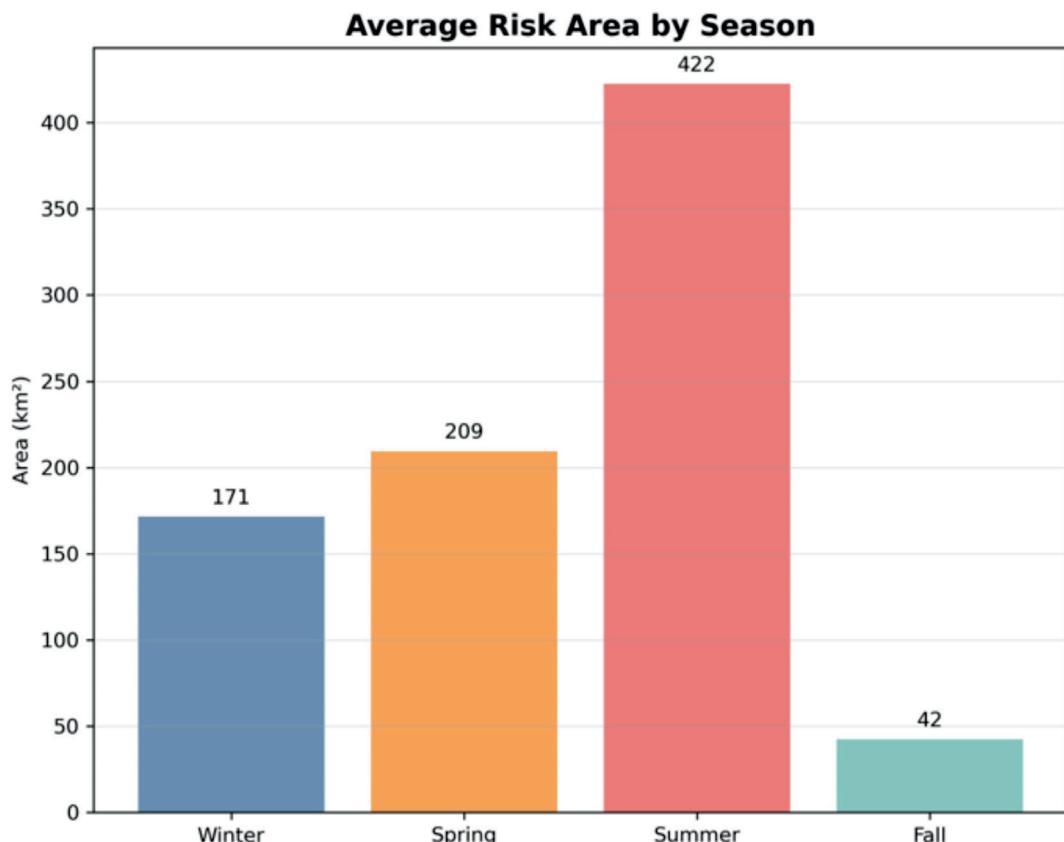


Рисунок 3. Сезонное распределение площади зон риска деградации (по BSI) в бассейне р. Кафирниган.

Интерпретация сезонной площади зон риска деградации. На рисунке 3 представленные данные показывают выраженную сезонность уязвимости почвенного покрова бассейна Кафирниган: максимальная площадь зон риска фиксируется летом — 422 км², что в 2,5 раза больше зимнего уровня (171 км², +147 %) и более чем в 2 раза превышает весенний показатель (209 км², +102 %). Осенью риск практически минимален (42 км², - 80 % к весне). Такая структура согласуется с климатическим режимом региона: в тёплый период на фоне повышенной температуры и дефицита влаги усиливаются процессы иссушения растительного покрова, распыления и дефляции почв, возрастает

вероятность палов/пожаров и «выгорания» травостоя; к осени при понижении температуры и частичном восстановлении растительности риск резко снижается. Совокупность результатов указывает, что лето — ключевое «окно уязвимости» ландшафта, когда необходимы усиленные меры противоэрозионной и противо-пожарной профилактики (регулирование выпаса, отказ от палов, поддержание защитных полос, рациональная ирригация). Методологически «зона риска» определяется порогом BSI, соответствующим среднему и более высоким классам оголения, что обеспечивает чувствительность индикатора к потенциально деградируемым участкам и их сезонным колебаниям.

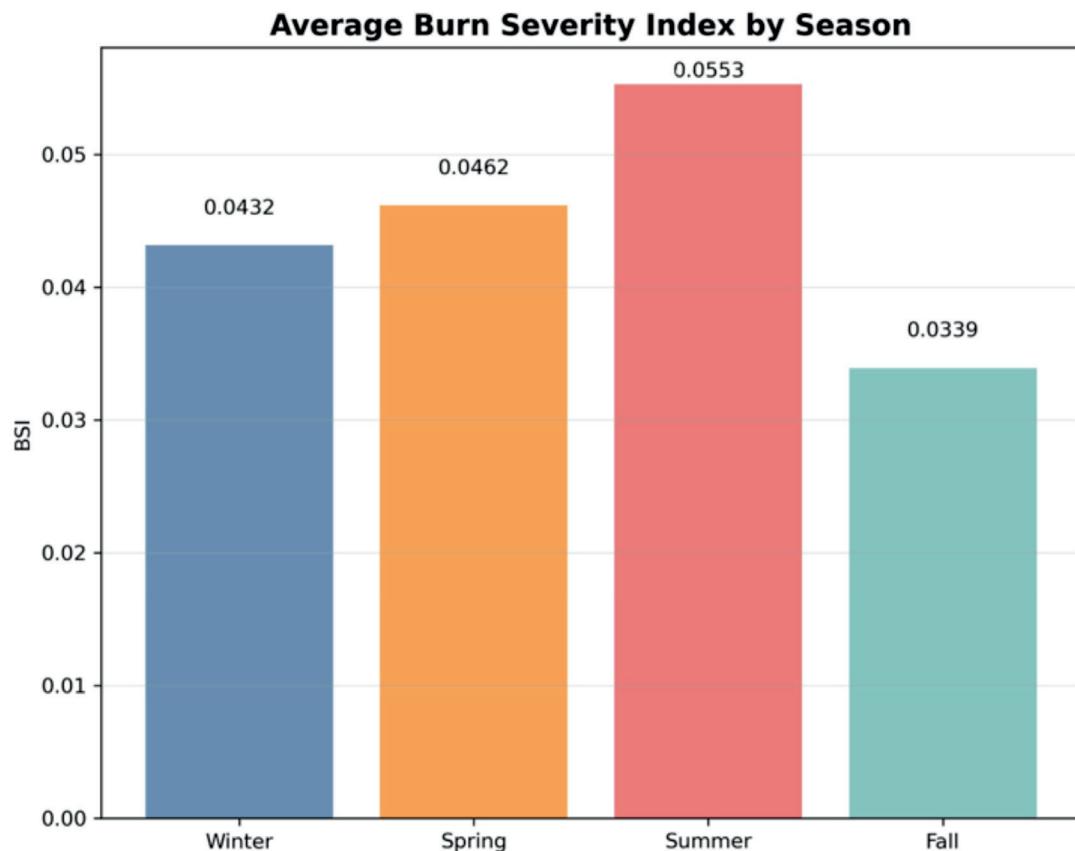


Рисунок 4. Сезонные средние значения индекса обжига (BSI) в бассейне р. Кафирниган: зима — 0,0432; весна — 0,0462; лето — 0,0553; осень — 0,0339. Максимум летом указывает на пиковую интенсивность повреждения растительного покрова.

Интерпретация сезонной динамики индекса обжига (Burn Severity Index). На рисунке 4 представлена диаграмма, отражающая выраженный сезонный максимум повреждения растительного покрова летом: среднее значение $BSI = 0,0553$, что на 28 % выше зимнего уровня (0,0432), на 19 % выше весеннего (0,0462) и на 63 % превышает осенний минимум (0,0339). Нарастание от зимы к весне и пикировка летом указывает на усиление термического стресса и горимости при сочетании высокой температуры, дефицита влаги и накопления сухого горючего материала. Резкое снижение осенью согласуется с по-

нижением температур и частичным восстановлением травяного покрова.

С практической точки зрения, лето — ключевое «окно уязвимости», когда необходимы усиленные меры профилактики: запрет палов, управление пастбищной нагрузкой, разрывы и минерализованные полосы на уязвимых склонах, оперативное информирование фермеров. Зимние и весенние значения остаются умеренными, но тренд роста к лету показывает, что ранневесенняя подготовка (уборка сухостоя, влагосберегающие приёмы на пашнях) критична для снижения летней интенсивности повреждений.

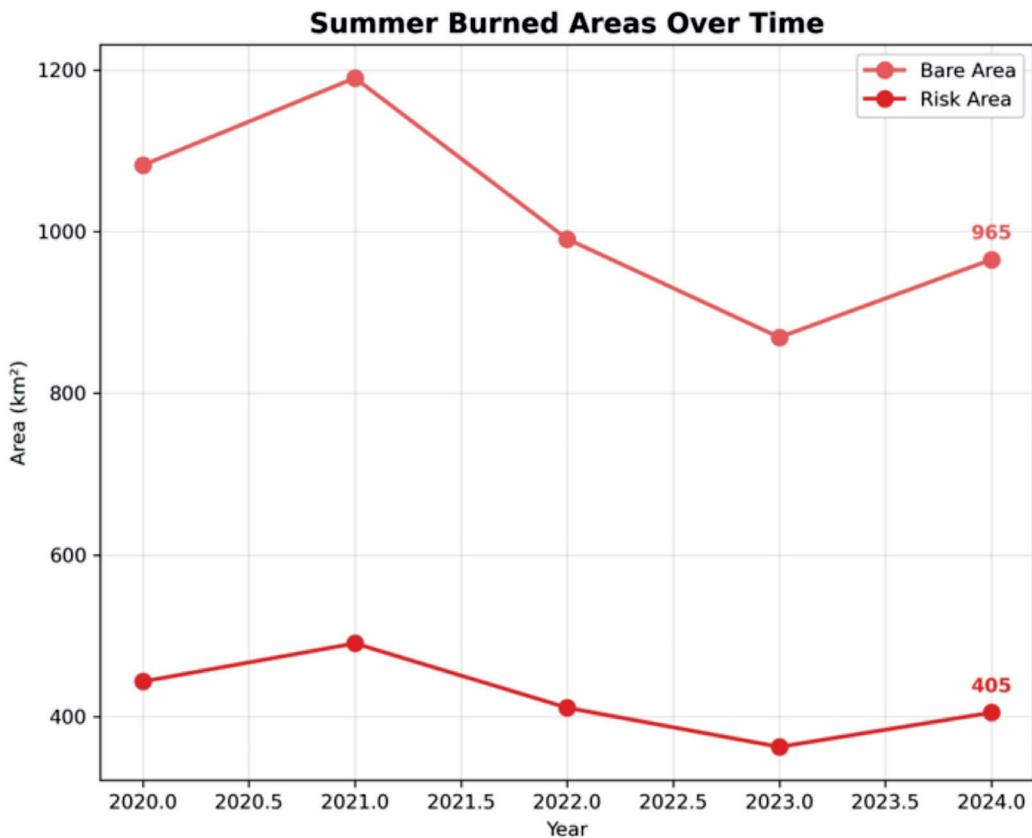


Рисунок 5. Летние выжженные площади в бассейне р. Кафирниган (2020–2024)

Интерпретация динамики летних выжженных площадей (2020–2024).

Рисунок 5 фиксирует высокий и изменчивый уровень выгорания в летний сезон. По метрике Bare Area наблюдается пик в 2021 г. ($\sim 1190 \text{ км}^2$), затем последовательное снижение к 2023 г. ($\sim 870 \text{ км}^2$) и частичный отскок в 2024 г. ($\sim 965 \text{ км}^2$). Аналогичная траектория у Risk Area: рост к 2021 г. ($\sim 490 \text{ км}^2$), спад до 2023 г. ($\sim 360 \text{ км}^2$) и восстановление в 2024 г. ($\sim 405 \text{ км}^2$). Таким образом, за 2021–2023 гг. площади снизились примерно на 25–30 %, после чего в 2024 г. выросли на $\sim 10\text{--}12\%$ относительно 2023 г., оставаясь, однако, близкими к уровню 2020 г. (Bare: - 9 % к 2020; Risk: - 9 % к 2020).

Научно это указывает на межгодовую вариабельность пожарной опасности, чувствительную к погодным аномалиям (жара/засуха), запасу «горючего» биомассы и антропогенному фактору (палы, агропрактики). Пиковый 2021 год веро-

ятно связан с сочетанием повышенной температуры и дефицита осадков, тогда как снижение к 2023 г. — с более благоприятными гидрометеоусловиями и/или мерами управления. Отскок в 2024 г. подчеркивает отсутствие устойчивого нисходящего тренда и необходимость постоянного мониторинга.

Обсуждение

Изучение оголённой почвы и начальных стадий деградации земель, как показал [14], является ключевым для оценки экологических изменений и устойчивости экосистем. В этих исследованиях BSI использовался совместно с вегетационными индексами (NDVI, SAVI), чтобы выявлять зоны с низким содержанием органического углерода и изменениями растительного покрова. В частности, исследования в Сариска Тайгер Резерв (Индия) показали отрицательную корреляцию BSI с SOC, что свидетельствует о снижении качества почвы на оголённых участках [1]. Аналогич-

но, исследования в Минангади Панчаяте, Ханое и Северном Судане подтвердили высокую эффективность BSI в выявлении деградированных земель и мониторинге засолённости [2-5].

В отличие от этих региональных и локальных исследований, наше исследование в бассейне р. Кафирниган охватывает пространственно-временной анализ с 2000 по 2024 гг., позволяющий не только выявлять оголённые участки, но и оценивать сезонные и межгодовые динамики деградации почв. В частности, выявлено, что максимальные площади оголения и зоны риска приходятся на летний сезон (~ 545 км 2 Bare Area, ~ 226 км 2 Risk Area), что в 2–2,5 раза выше, чем в зимний и весенний периоды, что демонстрирует выраженную сезонность процессов деградации и повышает точность раннего предупреждения и управления земельными ресурсами.

Дальнейшее отличие заключающееся в интеграции BSI с индексом обжига (Burn Severity Index) и картированием зон риска по классам оголения, что позволило оценить пиковую интенсивность повреждений растительного покрова и выявить летние «окна уязвимости» (рис. 4–5). В предыдущих исследованиях, например в Туркменистане и Устюрт-Аральском регионе, BSI применялся для выявления деградированных участков, но сезонная динамика и связь с пожарной опасностью не были столь детально проанализированы [12, 13].

Кроме того, пространственное распределение BSI по бассейну Кафирниган позволило выявить контраст между северными горными районами (низкий BSI, высокая сохранность растительного покрова) и южными предгорьями и равнинами (высокий BSI, активная деградация). Реализованный детальный анализ обеспечивает приоритетизацию управленческих мер: локализованная защита склонов, контроль пастбищной нагрузки, профилактика палов, укрепление

иригационных систем. Подобный комплексный подход сочетает спутниковый мониторинг, климатические данные и антропогенные факторы, что делает его более точным и применимым для регионального планирования по сравнению с отдельными локальными исследованиями [1, 3-5, 7-10, 13].

Полученные результаты указывают на ярко выраженные причины и следствия деградации почв в бассейне Кафирниган. Климатические факторы способствуют засушливому режиму: в регионе наблюдалось значительное потепление (прибавка температуры $\sim 1,2$ °C за последние десятилетия) при одновременном снижении осадков (на 15–20 %), приводящее к росту испарения и сокращению водных ресурсов, подтверждающееся снижением NDWI – показателя влажности поверхностных вод (минимум в 2024 г.) и ростом дефицита влаги. Скудный режим сточных вод и ограниченные ирригационные ресурсы усугубляют оголение почвы. Существенную роль играют антропогенные воздействия: интенсивное землепользование и урбанизация. Согласно исследованиям, в нижнем течении Кафирнигана свыше 90 % изменений гидрологического режима связано именно с деятельностью человека (в том числе расширение орошаемых и застроенных территорий). Активное распахивание склонов, выпас скота и вырубка лесов снижают устойчивость почв, увеличивая эрозию. Так, заметный прирост застроенных территорий (на 175 % к 2015 г.) указывает на сильную антропогенную трансформацию ландшафта.

В частности, комбинация этих факторов вызывает летние пожары: засушливое тепло сушит растительность, которая при плотном скоте и невыполнении противопожарных мер легко воспламеняется. В летние месяцы отмечаются и наиболее высокие значения индекса обжига (Burn Severity), и максимальные площади выго-

рания (рис. 2). Это указывает на то, что пик пустошения приходится на сезон максимальных температур и минимальных осадков.

Анализ карты (рис. 1) позволяет выявить устойчивые и уязвимые зоны. Северные высокогорья бассейна остаются относительно зелёными и малоподверженными деградации – низкие значения BSI говорят о целом растительном покрытии и большом запасе влаги. В противоположность этому, низменные предгорья и равнинные участки южной части бассейна оказались наиболее уязвимыми: здесь преобладают оранжевые и красные оттенки (высокое оголение). Такие участки требуют приоритетного внимания. Оползни, эрозия и формирование пустошь в них протекают быстрее.

Для управления рисками рекомендуются постоянный мониторинг состояния почв с помощью спутников (продолжение анализа BSI, NDVI, NDWI), а также локализованные меры. Необходимы мероприятия по ветрозащите и застанию пустошь (севооборот, посадка защитных лесополос) и ужесточение контроля за пожароопасным режимом (профилактика палов, тушение степных пожаров). На правительственном уровне важно интегрировать данные о состоянии почв в системы водно-аграрного планирования: например, адаптивное земледелие с учётом сезонной влажности и внедрение систем орошения. Только комплексный подход – учёт климатических изменений и ограничение разрушительной антропогенной нагрузки – позволит снизить темпы деградации в бассейне Кафирниган.

По результатам пространственно-временного анализа BSI, выявлено что площадь оголённых и опустынившихся земель наиболее высока в летний сезон и в последние годы резко возросла. Эти выводы подтверждаются внешними исследованиями о потеплении климата и усилении нагрузки на экосистемы региона.

Предложенные меры мониторинга и охраны почвовых ресурсов помогут стабилизировать ситуацию в критически уязвимых зонах бассейна.

Таким образом, результаты реализованных исследований не только подтверждают эффективность BSI для мониторинга оголённых земель, но также, что не менее важно, расширяют возможности его применения за счет оценки сезонной динамики, выжженных территорий и зон риска. Именно такой комплексный подход подтверждает его однозначную применимость для аридных и полуаридных регионов Центральной Азии и предоставляет практическую основу для разработки адаптивных стратегий устойчивого управления земельными и водными ресурсами.

Выводы

- Пространственная структура BSI: Северные горные районы бассейна р. Кафирниган сохраняют растительный покров и низкий BSI, тогда как южные предгорья и равнинны характеризуются высоким оголением почв и активной деградацией.

- Сезонная динамика: Лето — ключевое «окно уязвимости»: максимальные площади Bare Area ($\sim 545 \text{ км}^2$) и Risk Area ($\sim 226 \text{ км}^2$) в 2–2,5 раза выше, чем зимой и весной; осень демонстрирует минимальные значения.

- Индекс обжига и пожары: Burn Severity Index летом достигает пиковых значений (0,0553), что подтверждает высокую пожарную опасность и повреждение растительного покрова в тёплый сезон.

- Межгодовая изменчивость: Выжженные площади варьируют в 2020–2024 гг., с пиком в 2021 г. и последующими колебаниями, отражая влияние климатических аномалий и антропогенных факторов.

- Причины деградации: Основные факторы — повышение температуры ($\sim 1,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$), снижение осадков (15–20 %), деградации

фицит влаги, интенсивное землепользование, выпас скота и вырубка лесов.

- Рекомендации по управлению: Необходимы постоянный спутниковый мониторинг, меры противоэрозионной защиты, восстановление растительного покрова, контроль палов и интеграция данных о состоянии почв в адаптивное агропланирование и ирригационные системы.

Литература

1. Sajjad, H., et al., Assessing soil organic carbon and its relation with biophysical and ecological parameters in tropical forest ecosystem India. *Geocarto International*, 2025. 40(1): p. 2441388.
2. MASTROROSA, S., Integration of SAR and optical data for an automatic land consumption monitoring using Machine Learning algorithm. 2025.
3. Francis, A., et al., Soil Organic Carbon Estimation Using Remote Sensing Technique, in *Green Buildings and Sustainable Engineering: Proceedings of GBSE 2019*. 2020, Springer. p. 405-412.
4. Thu Ha, L.T., et al., Application of Multi-Spectral Index from Sentinel-2 Data for Extracting Build-up Land of Hanoi Area in the Dry Season. *Inżynieria Mineralna*, 2024. 2(1).
5. Zeyada, A.M., et al., Sentinel-2 Satellite Imagery Application to Monitor Soil Salinity and Calcium Carbonate Contents in Agricultural Fields. *Phyton* (0031-9457), 2023. 92(5).
6. Guo, B., et al., A novel-optimal monitoring index of rocky desertification based on feature space model and red edge indices that derived from sentinel-2 MSI image. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2022. 13(1): p. 1571-1592.
7. Xie, B., et al., Improved forest canopy closure estimation using multispectral satellite imagery within Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 2022. 14(9): p. 2051.
8. Chinilin, A.V., et al., Synergetic Use of Bare Soil Composite Imagery and Multitemporal Vegetation Remote Sensing for Soil Mapping (A Case Study from Samara Region's Upland). *Land*, 2024. 13(12): p. 2229.
9. Rakhmanov, D., et al., Assessment of agricultural land salinization via soil analysis and remote sensing data: Case study in Pavlodar region, Kazakhstan. *Soil & Water Research*, 2024. 19(2).
10. RAKHMANOV, D., et al., A Study of Salinization of Agricultural Soils in the Maisky District of the Pavlodar Region of Kazakhstan, Using Remote Sensing Data., in *Adaptation strategies for soil and water conservation in a changing world*. 2023.
11. He, C., et al., BLEI: Research on a Novel Remote Sensing Bare Land Extraction Index. *Remote Sensing*, 2024. 16(9): p. 1534.
12. Jaksibaev, R.N. and S.N. Gabbarov, *GEOINFORMATIONAL ANALYSIS OF THE NEGATIVE EFFECTS OF THE ARAL SEA ON PASTURES*. Theoretical & Applied Science, 2021(6): p. 356-362.
13. Berdyyev, A., et al., Desertification Monitoring Using Machine Learning Techniques with Multiple Indicators Derived from Sentinel-2 in Turkmenistan. *Remote Sensing*, 2024. 16(23): p. 4525.
14. Pettorelli, N., et al., Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in ecology & evolution*, 2005. 20(9): p. 503-510.

АРЗЁБИИ ФАЗОИЮ-ЗАМОНИИ ДЕГРАДАЦИИ ХОК ДАР ҲАВЗАИ ДАРЁИ КОФАРНИҲОН БО ИСТИФОДА АЗ НИШОНДИҲАНДАИ BSI (2000–2024)

Ҳикматуллозода Н.Х.¹, Гулаҳмадзода А.А.^{1,*}, Иноятова К.Л.¹, Қурбон Н.Б.¹

¹Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологиияи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон

*Муаллифи масъул. E-mail: agulakhmadov@gmail.com

Шарҳи муҳтасар. Дар таҳқиқоти мазкур арзёбии деградатсияи пӯшиши хок дар ҳавзаи дарёи Кофарниҳон бо истифода аз индекси хоки кушида (Bare Soil Index – BSI) аңҷом дода шудааст. Ҳисобҳо дар асоси маълумоти мөҳвораҳои *Landsat* ва *Sentinel* барои солҳои 2000, 2010, 2020 ва 2024 иҷро гардидаанд. Ҳаритаҳои тақсимоти фазоии нишондиҳандай BSI тартиб дода шуда, таҳлили мавсимии нишондиҳандаҳои фошишавии хок ва ҳатари деградатсия аңҷом дода шуд. Муайян карда шуд, ки тафовути возеҳи фазоӣ вуҷуд дорад: қисми шимолии кӯҳии ҳавза бо сатҳи настӣ фошишавии хок тавсиф мешавад, дар ҳоле ки минтақаҳои ҷанубӣ ва доманакӯҳҳо бо арзииҳои баланди BSI фарқ мекунанд, ки ин бо истифодаи шадиди замин ва равандҳои эрозионӣ вобаста мебошад. Динамикаи мавсимиӣ давраи асосии осебазириро муайян на-

муд – тобистон, вақте ки масоҳати хокҳои фошишуда ба ~545 км² мерасад ва минтақаҳои хатар бештар аз ду маротиба нисбат ба баҳор ва зимистон зиёд мешаванд. Нииондиҳандай сӯхташавӣ низ дар моҳҳои тобистон ба ҳадди аксар мерасад, ки ин аз афзоши равандҳои сӯхторӣ шаҳодат мебиҳад. Таҳлили маълумоти солҳои 2020–2024 ниишон дод, ки масоҳати заминҳои сӯхташуда босуръат афзуда, дар соли 2021 ба 1190 км² расидааст, баъдан коҳии ёфтагиаш ва қисман барқарор гардидааст, ки ин ба тағйирёбии баландсолони хатари сӯхтор ишора мекунад. Натиҷаҳои бадастомада зарурати мониторинги доимӣ ва таҳияи чорҳои мутобиқшавиро барои пешгирии эрозия ва сӯхторҳо дар ҳавзаи дарёи Кофарниҳон таъкид мекунанд.

Калидвоожаҳо. Индекси хоки кушиода (*Bare Soil Index – BSI*), деградатсияи замин, динамикаи мавсими, нииондиҳандай сӯхташавӣ (*Burn Severity Index*), ҳавзаи дарёи Кофарниҳон.

SPATIAL-TEMPORAL ASSESSMENT OF SOIL DEGRADATION IN THE KOFARNIHON RIVER BASIN USING THE BARE SOIL INDEX (BSI) (2000–2024)

Khikmatullozoda N.H.¹, Gulahmadzoda A.A.^{1,*}, Inoyatova K.L.¹, Kurbon N.B.¹

¹Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan

*Corresponding author. E-mail: agulakhmadov@gmail.com

Abstract. This paper assesses soil degradation in the Kofarnihon River Basin using the Bare Soil Index (BSI) calculated using Landsat and Sentinel satellite data for 2000, 2010, 2020, and 2024. Maps of the BSI spatial distribution were constructed, and a seasonal analysis of bare soil indicators and degradation risk was performed. A pronounced spatial difference was identified: the mountainous northern part of the basin is characterized by a low level of soil bare soil, while the southern and foothill areas demonstrate high BSI values associated with intensive land use and erosion processes. Seasonal dynamics revealed a key period of vulnerability—summer, when the area of bare soil reaches ~545 km², and risk zones more than double compared to spring and winter. The scorching index also reaches a maximum in the summer months, reflecting an increase in fire hazard processes. Data analysis for 2020–2024. The study showed a sharp increase in burned areas (up to 1,190 km² in 2021) followed by a decrease and partial recovery, indicating high interannual variability in fire danger. These results highlight the need for ongoing monitoring and the development of adaptive measures to prevent erosion and fires in the Kofarnihon River Basin.

Keywords: Bare Soil Index (BSI), land degradation, seasonal dynamics, Burn Severity Index, Kofarnihon River Basin.

Маълумот оид ба муаллифон. Ҳикматуллоҳозода Нурбоби Ҳикматуллаевна – ходими илмии Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон, Тел.: (+992) 209707007, E-mail: ray05.03.25@gmail.com; Гулаҳмадзода Аминҷон Абдуҷаббор – доктори илмҳои техники, директори Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон, Тел.: (+992) 885471616, E-mail: agulakhmadov@gmail.com; Иноятова Камола Лавзаровна – докторантни Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон. Тел.: (+992) 934447352, E-mail: kamola.ikl@gmail.com; Курбон Номвар Бойназар - номзади илмҳои техники, дотсент, мудири озмоишгоҳи моделкунонии заҳираҳои об ва равандҳои иқлими Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон, Тел.: (+992) 934748866, E-mail: knomvarb.0502@gmail.com.

Сведения об авторах. Хикматуллоҳозода Нурбоби Ҳикматуллаевна – научный сотрудник Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, Тел.: (+992)209707007, E-mail: ray05.03.25@gmail.com; Гулаҳмадзода Аминҷон Абдуҷаббор - доктор технических наук, директор Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана. Тел.: (+992)885471616, E-mail: agulakhmadov@gmail.com; Иноятова Камола Лавзаровна – докторантна Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, Тел.: (+992)934447352, E-mail: kamola.ikl@gmail.com; Курбон Номвар Бойназар - кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией моделирования водных ресурсов и климатических процессов Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, Тел.: (+992) 934748866, E-mail: knomvarb.0502@gmail.com.

Information about the authors. Khikmatullozoda Nurbibi Hikmatulloevna – researcher at the Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Tel.: (+992)209707007, E-mail: ray05.03.25@gmail.com, Gulahmadzoda Aminjon Abdujabbor – Doctor of the

Technical Science, Director of the Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Tel.: (+992) 885471616. E-mail: agulakhmadov@gmail.com; Inoyatova Kamola Lavzarovna - PhD student at the Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Tel.: (+992)93 4447352, E-mail: kamola.ikl@gmail.com.

УДК 91:330.341 (735.3)

МОДЕЛЬ ЗОНИРОВАНИЯ ЗОРКУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАПОВЕДНИКА КАК ИНСТРУМЕНТ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОГОРНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ

Холмамадов А.А.^{1,*}

¹Хорогский государственный университет им. М.Назаршоев

*Автор-корреспондент. E-mail: asadkholtamadov@gmail.com

Аннотация. В статье представлена разработанная модель зонирования территории Зоркульского государственного заповедника, направленная на долгосрочное сохранение природных комплексов в условиях высокогорной, экологически уязвимой экосистемы. Модель основана на принципах дифференцированной охраны природных территорий и интегрирует международные рекомендации (IUCN, FAO, UNEP) с локальными социально-экономическими реалиями. Выделены три функциональные зоны — ядро строгой охраны, буферная и переходная зоны — каждая из которых имеет собственный режим природопользования, определяемый экологической ценностью и устойчивостью территории. Инфографическая схема зонирования, выполненная в виде концентрической модели с цветовым кодированием, позволяет одновременно визуализировать пространственную структуру охранных режимов и представить детализированное описание допустимых видов деятельности. Применение модели способствует снижению антропогенной нагрузки, сохранению местообитаний редких видов, оптимизации взаимодействия с местными сообществами и повышению эффективности мониторинга. Внедрение предложенного подхода рассматривается как эффективный инструмент адаптивного управления экосистемами, способствующий устойчивому развитию региона.

Ключевые слова. Зоркульский государственный заповедник; зонирование; адаптивное управление; высокогорные экосистемы; особо охраняемые природные территории; пастбищные ресурсы; экосистемный подход; международные стандарты охраны природы; IUCN; устойчивое природопользование.

Введение

Рациональное распределение и использование территориальных ресурсов является одной из ключевых основ устойчивого управления особо охраняемыми природными территориями (ООПТ), что особенно актуально для горных и трансграничных экосистем, отличающихся высокой природной уязвимостью и чувствительностью к антропогенному воздействию [3,4, 7, 8, 11].

По мнению М. Шарпли и Д. Холла, эффективное пространственное планирование позволяет минимизировать деградацию природных комплексов, сохраняя баланс между приоритетами охраны природы и социально-экономическими интересами местных сообществ [10].

В условиях высокогорных территорий, подобных Зоркульскому государственному заповеднику, пространственная организация природопользования приобретает особую значимость ввиду низкой восстановительной способности ландшафтов и их зависимости от климатических и антропогенных факторов [5, 9]. Установление функциональных зон охраны и дифференциация режимов использования природных ресурсов рассматриваются как неотъемлемые элементы стратегии долгосрочного сохранения биоразнообразия и предотвращения деградации экосистем [1, 2, 6].

Материалы и методы. Материалами исследования послужили данные, полученные в пределах территории Зоркуль-