



УДК: 528.9:504.55(575.1)

**Озодхон КУЗИБАЕВА,**

*Доктор географических наук, профессор, Кокандский государственный университет, Коканд, Узбекистан*

*E-mail: ozodaqoziboyeva@gmail.com, ORCID: 0009-0001-3366-4044*

**Жавохир УМАРОВ,**

*Исследователь, Кокандский государственный университет, Коканд, Узбекистан*

*E-mail: javohirumarov07071997@gmail.com, ORCID: 0009-0009-9834-2888*

*Рецензент: доктор биологических наук, профессор В.Исоков*

## МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЛАНДШАФТОВ ЮЖНОЙ ФЕРГАНЫ НА ОСНОВЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация

В статье рассматривается методология мониторинга и прогнозирования экологического состояния ландшафтов Южной Ферганы на основе технологий географических информационных систем (ГИС). В исследовании сформирована многолетняя статистическая база данных по рельефу, почвам, глубине и минерализации грунтовых вод, засолению почв, бонитету земель и урожайности сельскохозяйственных культур; применены ГИС-технологии, методы геостатистической интерполяции и трендового анализа. На основе полученных результатов спрогнозированы вероятные сценарии развития процессов засоления и деградации на периоды до 2030 и 2035 годов.

**Ключевые слова:** ГИС-технологии, экологический мониторинг, ландшафт, засоление почв, грунтовые воды, дистанционное зондирование, прогнозирование, ландшафты Южной Ферганы.

## GIS-TEKNOLOGIYALAR ASOSIDA JANUBIY FARG'ONA LANDSHAFTLARINING EKOLOGIK HOLATINI MONITORING QILISH VA PROGNOZLASH

Аннотация

Maqolada geoaxborot tizimlari (GIS) texnologiyalari asosida Janubiy Farg'ona landshaftlarining ekologik holatini monitoring qilish va prognozlash metodologiyasi yoritilgan. Tadqiqotda relyef, tuproq, yer osti suvlari chuqurligi va minerallashuvi, tuproq sho'rlanishi, yer unumdorligi (bonitet) hamda ekinzorlar hosildorligi bo'yicha ko'p yillik statistik ma'lumotlar bazasi shakllantirildi va GIS texnologiyalari, geostatistik interpolatsiya va tendensiya tahlili usullari qo'llanildi. Olingan natijalar asosida 2030 va 2035-yillargacha bo'lgan davrlar uchun sho'rlanish va degradatsiya jarayonlarining ehtimoliy rivojlanish ssenariylari prognoz qilindi.

**Kalit so'zlar:** GIS-texnologiyalar, ekologik monitoring, landshaft, tuproq sho'rlanishi, yer osti suvlari, masofadan zondlash, prognozlash, Janubiy Farg'ona landshaftlari.

## MONITORING AND FORECASTING THE ECOLOGICAL CONDITION OF SOUTH FERGANA LANDSCAPES BASED ON GIS TECHNOLOGIES

Annotation

The article presents a methodology for monitoring and forecasting the ecological condition of South Fergana landscapes based on geographic information system (GIS) technologies. The study compiled a long-term statistical database on relief, soils, groundwater depth and mineralization, soil salinization, land productivity (bonitet), and crop yields, and applied GIS technologies, geostatistical interpolation, and trend analysis methods. Based on the results obtained, probable development scenarios for salinization and degradation processes were forecast for the periods up to 2030 and 2035.

**Keywords:** GIS technologies, ecological monitoring, landscape, soil salinization, groundwater, remote sensing, forecasting, South Fergana landscapes.

**Введение** В последние десятилетия геоинформационные системы (ГИС) и технологии дистанционного зондирования стали одним из основных инструментов оценки и управления экологическим состоянием сельскохозяйственных ландшафтов. Технологии ГИС позволяют объединить в единую систему данные за несколько лет, оперативно обновлять их и анализировать взаимосвязи между различными природно-хозяйственными факторами. Ландшафты Южной Ферганы являются наиболее густонаселёнными ландшафтами Ферганской области. Поскольку население здесь издавна проживает плотно и привыкло к орошаемому земледелию, особое место занимает потребность в воде, так как на равнинных участках.

Задачи исследования заключаются в следующем: (1) формирование базы многолетних статистических данных по ландшафтам Южной Ферганы (рельеф, почва, грунтовые воды, засоление, бонитет, урожайность); (2) сопоставление полученных данных и анализ и оценка экологического состояния с помощью методов геостатистической интерполяции; (3) наблюдение за динамикой растительного покрова и состояния почв на основе данных дистанционного зондирования (NDVI Sentinel-2 и индексы засоления почв); и (4) прогнозирование будущего развития процессов засоления и деградации посредством анализа временных рядов и сценарного моделирования.

**Обзор литературы** Вопрос оценки экологического состояния сельскохозяйственных ландшафтов с использованием ГИС и данных дистанционного зондирования широко освещён в мировой литературе. М. Ибрагимов и

другие [3] на примере Хорезма показали взаимосвязь между уровнем грунтовых вод и засолением почв, а также роль критической зоны 1,5–3,0 м. С. Мешо и другие [4] подтвердили этот механизм в масштабах всей Центральной Азии на основе данных дистанционного зондирования. А. Хамидов и другие [5] проанализировали проблемы управления водно-земельными ресурсами в регионе, а В.Е. Чуб [6] оценил гидрометеорологические и агроклиматические последствия изменения климата на национальном уровне. Геоэкологические особенности Ферганского региона были освещены в ряде диссертационных исследований (Кузибоева [1], Абдуганиев [7], Боймирзаев [8]), преимущественно с использованием статистико-описательных методов. В мировой практике для мониторинга и прогнозирования ландшафтов широко применяются методы многокритериального пространственного анализа (MCDA), кригинг и подход клеточных автоматов-Маркова. Вместе с тем целостное исследование, интегрирующее имеющиеся данные по Южной Фергане в среде ГИС, до сих пор не проводилось, что определяет актуальность настоящей работы.

**Методы и материалы исследования.** Для исследования по всем районам ландшафтов Южной Ферганы для орошаемых земель были подготовлены следующие данные: (1) рельеф — слои уклона и экспозиции на основе цифровой модели рельефа (DEM) SRTM с разрешением до 30 м; (2) почва — имеющиеся почвенно-картографические данные по типам почв и механическому составу; (3) глубина и минерализация грунтовых вод — статистические данные, собранные Сохско-Сырдарьинской гидрогеолого-мелиоративной экспедицией Ферганской области; (4) засоление почв — данные мелиоративного кадастра; (5) баллы бонитета земель; и (6) статистика урожайности сельскохозяйственных культур за 2024–2025 годы. Все слои были приведены к единой системе координат (WGS 84 / UTM 42N) и сохранены в векторном (административные границы, точки наблюдения) и растровом (интерполированные поверхности) форматах.

**Методы ГИС-анализа** Для пространственного анализа использовалась среда открытого программного обеспечения ГИС (QGIS). Были применены следующие методы:

✓ Анализ наложения (overlay) полученных данных — определение степени соответствия слоёв глубины залегания грунтовых вод, доли засоления и бонитета для ландшафтов Южной Ферганы путём их сопоставления друг с другом;

✓ Геостатистическая интерполяция (обычный кригинг) — проецирование полевых данных наблюдений (глубина залегания грунтовых вод, степень минерализации) в непрерывные растровые данные;

✓ Многокритериальная оценка (Weighted Overlay / MCDA) — расчёт интегрального индекса экологического состояния (ИЭС) для каждого ландшафта путём объединения показателей глубины залегания грунтовых вод (0,35), доли засоления почв (0,30), балла бонитета (0,20) и доли орошаемых земель с неудовлетворительным мелиоративным состоянием (0,15);

✓ Анализ дистанционного зондирования — сопоставление слоёв нормализованного вегетационного индекса (NDVI) и нормализованного индекса засоления почв (NDSI), полученных со спутниковых снимков Sentinel-2, с данными наземных наблюдений;

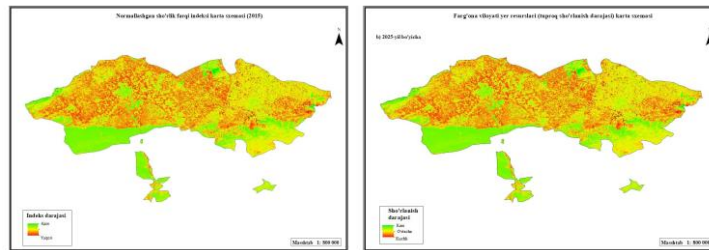


Рис. 1, 2. Карта засоления почв ландшафтов Южной Ферганы за 2015 и 2025 годы

Карта NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) Ферганской области, рассчитанная на основе данных Sentinel-2: состояние на 2020 и 2025 годы. Источник: рассчитано авторами на основе спутниковых снимков Sentinel-2.

Сопоставление карт NDVI по Ферганской области за 2020 и 2025 годы показало значительные изменения в состоянии растительного покрова. Если в 2020 году в центральной и северной частях области преобладали сплошные зелёные ландшафты с высокими значениями NDVI (0,248–0,589), то к 2025 году эти зоны приобрели гораздо более раздробленный и фрагментированный вид, а также расширились участки жёлтого оттенка с низкими значениями NDVI (0,036–0,146), особенно в центральной и юго-западной частях области. Это изменение позволяет говорить об общем снижении плотности растительного покрова и увеличении площадей открытой почвы либо подвергшихся засолению участков. Также было отмечено некоторое расширение зоны с отрицательными значениями NDVI (водные объекты) в северо-восточной части (в районе Сырдарьи).

Полученные результаты подтверждают согласованность с данными мелиоративного кадастра, приведёнными в предыдущих разделах, относительно засоления почв и близости грунтовых вод к поверхности земли: наблюдаемая в 2020–2025 годах тенденция снижения вегетационного индекса в категории районов с неудовлетворительным экологическим состоянием — Бувайда, Богдод, Дангара, Ёзьяван, Кошттепа — ещё раз подтверждает практическую возможность объединения данных дистанционного зондирования с показателями, полученными в ходе полевых исследований.

- Анализ тенденций и прогнозирование — подбор линейных и экспоненциальных трендовых моделей для временных рядов площади засоления и баллов бонитета за 2021–2025 годы, а также моделирование вероятных сценариев изменения площади засоления на период до 2030 и 2035 годов на основе подхода клеточных автоматов-Маркова (Cellular Automata–Markov).

#### Формула расчёта индекса экологического состояния

Интегральный индекс экологической уязвимости (ИЭС) для каждого района рассчитывался по следующей формуле взвешенного суммирования:

$$ИЭС = 0,35 \times Gw + 0,30 \times Sal + 0,20 \times (100 - Bon) + 0,15 \times Melio$$

где Gw — доля площади залегания грунтовых вод в критической зоне 1,5–3,0 м (нормализованная по шкале 0–100), Sal — доля засоленных земель (%), Bon — балл бонитета земель (0–100), Melio — доля орошаемых земель с

неудовлетворительным мелиоративным состоянием (нормализованная по шкале 0–100). Районы с высоким значением ИЭС считаются более уязвимыми в экологическом отношении.

**Результаты и обсуждение (Results and Discussion)** Карта экологического состояния ландшафтов, составленная на основе изложенной выше методологии, разделила ландшафты на три категории: высокое экологическое состояние (ИЭС > 65), среднее (ИЭС 40–65) и низкое экологическое состояние (ИЭС < 40). В зону высокой уязвимости были включены районы Бувайда, Богдод, Дангара, Ёзьяван и Кошттепа — эти районы также выделялись в предыдущем описательном анализе неглубоким залеганием грунтовых вод, высокой долей засоления и низкими баллами бонитета. В этих районах было установлено, что многолетнее расположение уровня грунтовых вод в критической зоне 1,5–3,0 м почти полностью совпадает с засоленными площадями, что подтверждает практическую значимость ГИС-анализа.

Сопоставление слов NDVI и NDSI, рассчитанных по снимкам Sentinel-2, с данными мелиоративного кадастра показало, что в районах с высоким значением ИЭС индекс растительного покрова оставался более низким даже в период пика вегетации, тогда как индекс засоления почв демонстрировал более высокие значения. Это совпадение показывает, что объединение данных дистанционного зондирования с показателями, измеренными в полевых условиях, может позволить в дальнейшем расширить и ускорить годовой цикл мониторинга — что особенно важно для дехканских (приусадебных) земельных участков, пока не полностью охваченных официальным кадастром.

#### **Прогнозные сценарии до 2030 и 2035 годов**

Экстраполяция тенденции площади засоления за период 2021–2025 годов на основе подхода клеточных автоматов-Маркова показала два сценария. Согласно первому (базовому) сценарию, при сохранении существующей практики дренажа и промывки, общая засоленная площадь в зоне высокой уязвимости к 2030 году сократится ещё на 3–6 процентов, однако сама критическая зона практически не изменится. Согласно второму (климато-стрессовому) сценарию, при продолжении тенденции регионального потепления и сокращения осадков и отсутствии дополнительных инвестиций в дренажную сеть, к 2035 году существует вероятность повторного роста засоленной площади в районах Бувайда, Богдод и Дангара, а также перехода районов Ташлак и Фуркат, находящихся в настоящее время в категории средней уязвимости, в категорию высокой уязвимости. Эти результаты показывают, что основная ценность ГИС-прогнозирования заключается в заблаговременном выявлении районов, находящихся в «пограничном состоянии», способных изменить категорию уязвимости.

**Заключение** Проведённое исследование продемонстрировало практическую эффективность ГИС-технологий в мониторинге и прогнозировании экологического состояния ландшафтов бассейна Южной Ферганы. Формирование многослойной пространственной базы данных, расчёт интегрального индекса экологической уязвимости посредством взвешенного наложения и обогащение данными дистанционного зондирования позволили чётко выделить критические зоны бассейна, показать их взаимосвязь и спрогнозировать направление будущего развития в виде сценариев.

В качестве практических рекомендаций предлагается следующее:

- наладить годовой цикл мониторинга и регулярно обновлять ГИС-базу в категории районов с хорошим экологическим состоянием (Бувайда, Богдод, Дангара, Ёзьяван, Кошттепа);
- провести дополнительные полевые и лабораторные исследования в «аномальных» районах, таких как Ташлак;
- создать единую ГИС-платформу, интегрирующую мониторинг NDVI/NDSI на основе Sentinel-2 с официальным мелиоративным кадастром;
- разработать долгосрочную (до 2030–2035 годов) региональную стратегию мониторинга, охватывающую в том числе земельные участки, направленную на прогнозирование процессов засоления и деградации.

#### **ADABIYOTLAR**

1. Кўзибоева, О.М. Жанубий Фарғона ландшафтларининг иқлим ва ер ости сувлари билан ўзаро таъсири ҳамда уларнинг геоэкологик тахлили. DSc (География) диссертацияси, 11.00.01 — Табиий география, Ўзбекистон, 2022.
2. Фарғона вилояти Сўх-Сирдарё гидрогеологик-мелиоратив экспедицияси. Фарғона вилояти туманларининг ер ости сувлари чуқурлиги ва минераллашуви сўрови ҳамда тупроқ шўрланиши кадастри, 2021 ва 2024–2025.
3. Ibrakhimov, M.; Khamzina, A.; Forkutsa, I.; va boshq. Groundwater table and salinity: spatial and temporal distribution and influence on soil salinization in Khorezm region (Uzbekistan, Aral Sea Basin). Irrigation and Drainage Systems, 2007, 21, 219–236.
4. Measho S.; Li, F.; Pellikka, P.; va boshq. Soil Salinity Variations and Associated Implications for Agriculture and Land Resources Development Using Remote Sensing Datasets in Central Asia. Remote Sensing, 2022, 14, 2501.
5. Hamidov A.; Helming, K.; Balla, D. Impact of agricultural land use in Central Asia: A review. Agronomy for Sustainable Development, 2016, 36, 6.
6. Chub V.E. Иқлим ўзгариши ва унинг Ўзбекистон гидрометеорологик жараёнларига, агроиқлим ва сув ресурсларига таъсири; Ўзгидромет, НИГМИ, ВОРИС-НАШПРИЁТ: Тошкент, Ўзбекистон, 2007.
7. Абдуғаниев, О. Муҳофаза этиладиган табиий ҳудудлар тизимини ташкил этишининг геоэкологик жиҳатлари (Фарғона вилояти мисолида). PhD (География) диссертацияси, Тошкент, Ўзбекистон, 2008.
8. Boymirzayev K.M. Farg'ona botig'i vohalarining agro-irrigatsion yotqiziqlarini ko'p funktsiyali landshaft tahlili. DSc (Geografiya) dissertatsiyasi, Samarqand, O'zbekiston, 2020.
9. Кўзибоева О., Шербаева З., 2024. Жанубий Фарғона дарёларининг сув режимига иқлим ўзгаришининг таъсири. Фарғона давлат университети.
10. Кузибоева О. 2020. Landscape-Land reclamation approach in the study of conal landscape complexes. The American Journal of Applied Sciences.
11. Кўзибоева О., Абдиназаров Б., 2025. Тоғ олди текисликлардаги конуссимон ёйилма ландшафтларини ўрганилиши. Acta NUUZ, 3(3.2), 226–228.
12. Кузибоева О.М. 2020. Issues of optimization of geoecological situation in Fergana Valley. JournalNX.
13. Кузибоева О., Исроилова О. 2022. Иқлим ўзгариш шароитининг Жанубий Фарғона дарёларининг сув режимига таъсири. Комплекс географик тадқиқотлар: инновация ва амалиёт. Республика илмий-амалий конференцияси. Андижон, Б. 32–35.
14. Kuziboeva O.M. Landscaph-land reclamation approach in the study of conical landscape complexes The American journal of applied sciences Учредители: The USA Journals 2 (10) 2020