УДК 332.3:528.8

Нуруллаев А.А.
магистрант
Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского
Россия, г. Иркутск
Хайтимматов С.Х.

доцент кафедры геодезии, картографии и кадастра
Ургенчский государственный университет
Узбекистан, г. Ургенч

Садуллаева Н.У.
преподаватель кафедры геодезии, картографии и кадастра
Ургенчский государственный университет
Узбекистан, г. Ургенч

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ, ВЫБЫВШИХ ИЗ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ОБОРОТА, В ХОРЕЗМСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ИНДЕКСОВ NDWI И SI

Аннотация: в статье рассматривается проблема выбытия орошаемых земель из сельскохозяйственного оборота в Хорезмской области Республики Узбекистан, где за 2015–2025 гг. площадь таких земель увеличилась с 1 850 до 5 450 га. Цель исследования – разработать и апробировать методику выявления выбывших земель по данным дистанционного зондирования Земли. По снимкам Landsat 5/7 и Sentinel-2 за 1998–2025 гг. рассчитаны индексы NDVI, NDWI и SI, их значимость оценена методом анализа иерархий, а интегральный индекс риска сформирован в среде ArcGIS. Показано, что NDVI на залежах с дикой растительностью завышает риск, поэтому итоговая модель построена на равновзвешенных NDWI и SI. В 2025 г. к устойчивым отнесено 27,5 % сельскохозяйственных земель, к средне- и сильнодеградированным – по 36 %, а площадь, определённая в ГИС, отличается от статистической на 0,42 %.

Ключевые слова: мониторинг земель, выбывшие из оборота земли, дистанционное зондирование, NDWI, индекс засоления, метод анализа иерархий, Хорезмская область.

Nurullaev A.A.
master's student
Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky
Russia, Irkutsk
Khaytimmatov S.Kh.
associate professor, Department of Geodesy, Cartography and Cadastre
Urgench State University
Uzbekistan, Urgench
Sadullaeva N.U.
position, organization
Uzbekistan, Urgench

GEOINFORMATION MONITORING OF ABANDONED AGRICULTURAL LANDS IN KHOREZM REGION BASED ON NDWI AND SI INDICES

Abstract: the article addresses the abandonment of irrigated land in Khorezm region of Uzbekistan, where the area of land withdrawn from agricultural use grew from 1,850 to 5,450 ha in 2015–2025. The aim of the study is to develop and test a method for identifying abandoned land from Earth remote sensing data. NDVI, NDWI and SI indices were calculated from Landsat 5/7 and Sentinel-2 imagery for 1998–2025, their importance was assessed with the analytic hierarchy process, and an integral risk index was built in ArcGIS. NDVI was shown to overestimate risk on fallow land covered by wild vegetation, so the final model uses equally weighted NDWI and SI. In 2025, 27.5% of agricultural land was classified as stable and about 36% each as moderately and severely degraded, while the GIS-derived area differs from official statistics by 0.42%.

Keywords: land monitoring, abandoned agricultural land, remote sensing, NDWI, salinity index, analytic hierarchy process, Khorezm region.

Введение

Орошаемое земледелие остаётся основой аграрной экономики Хорезмской области: территория лишена достаточных атмосферных осадков, и производство сельскохозяйственной продукции полностью зависит от водозабора из Амударьи. Одновременно область относится к районам с высоким риском деградации земель. Близкое залегание минерализованных грунтовых вод, интенсивное испарение и износ коллекторно-дренажной сети вызывают вторичное засоление, в результате которого часть угодий утрачивает продуктивность и перестаёт использоваться.

Законодательство Республики Узбекистан рассматривает мониторинг как обязательный элемент управления земельными ресурсами [1]. Постановлением Кабинета Министров от 14 января 2022 г. № 22 утверждён порядок мониторинга земель сельскохозяйственного назначения, предусматривающий периодические, текущие и оперативные наблюдения за их площадью, состоянием и использованием [2]. Выполнение этих требований на уровне области невозможно без технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и геоинформационных систем (ГИС).

Исследования, выполненные в низовьях Амударьи, подтверждают масштаб проблемы. По временным рядам MODIS за 2000–2010 гг. около трети территории Хорезма (порядка 161 тыс. га) показала отрицательный тренд вегетационного индекса, указывающий на деградацию пахотных земель [3]. Картографирование заброшенных пахотных земель в бассейне Аральского моря оценило их долю в Хорезмской области в 9 %, а в соседнем Каракалпакстане – в 40 % [4]. Вместе с тем эти работы основаны на снимках низкого пространственного разрешения и вегетационных индексах, тогда

как в условиях Хорезма главными причинами выбытия земель являются дефицит влаги и засоление.

Цель настоящего исследования – разработать методику выявления земель, выбывших из сельскохозяйственного оборота, на основе спектральных индексов влажности и засоления и многокритериальной оценки в среде ГИС и апробировать её на территории Хорезмской области.

Материалы и методы

Территория исследования охватывает сельскохозяйственные земли Хорезмской области, расположенной в низовьях Амударьи. Общий земельный фонд области составляет около 605,5 тыс. га, из них орошаемые посевные площади – 230–240 тыс. га. Для ретроспективного анализа использованы снимки Landsat 5 TM (1998 и 2010 гг.), Landsat 7 ETM+ (2000 г.) с разрешением 30 м и Sentinel-2 MSI (2025 г.) с разрешением 10 м [9]. Отбор безоблачных сцен, маскирование облаков и построение среднегодовых композитов выполнены на платформе Google Earth Engine [10], дальнейший анализ – в ArcGIS.

Для каждого года рассчитаны три спектральных индекса. Вегетационный индекс NDVI характеризует фотосинтетическую активность растительности [5], индекс NDWI – увлажнённость поверхности [6], индекс засоления SI – содержание солей в поверхностном слое почвы [7]:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (1)$$

$$NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR), \quad (2)$$

$$SI = \sqrt{(BLUE \cdot RED)}, \quad (3)$$

где BLUE, GREEN, RED и NIR – коэффициенты отражения в синем, зелёном, красном и ближнем инфракрасном каналах.

Относительная значимость индексов определена методом анализа иерархий Т. Саати [8]. По экспертной оценке NDVI признан вдвое важнее

NDWI и вчетверо важнее SI, а NDWI – втрое важнее SI. Полученные веса приведены в таблице 1. Максимальное собственное значение матрицы составило $\lambda max = 3{,}02$, индекс согласованности CI = 0,01, отношение согласованности CR = 0,017, что значительно ниже допустимого порога 0,1.

Таблица 1 – Матрица попарных сравнений и весовые коэффициенты индексов

Критерий	**NDVI**	**NDWI**	**SI**	**Вес, %**
NDVI	1	2	4	56
NDWI	1/2	1	3	32
SI	1/4	1/3	1	12

Перед интеграцией значения индексов нормированы из интервала [−1; 1] в интервал [0; 1]. Проверочный расчёт по трём индексам с весами из таблицы 1 показал, что NDVI искажает результат: на залежах, не засевавшихся в течение многих лет, развивается дикая травянистая растительность, и такие участки получают высокие значения индекса. В результате модель относила к выбывшим 60–70 % территории области. Поэтому в итоговой модели NDVI исключён, а NDWI и SI приняты с равными весами:

$$RISK = 0{,}5 \cdot NDWI + 0{,}5 \cdot (1 - SI). \quad (4)$$

Полученный растр классифицирован на три класса: устойчивые земли (0,49–0,76), земли средней степени деградации (0,46–0,49) и выбывшие из оборота земли (0,35–0,46). Площади классов рассчитаны инструментом Tabulate Area.

Для полевой проверки выбраны шесть контрольных полигонов: три на постоянно засеваемых землях (Хивинский, Шити, Бешуй) и три на землях, не засевавшихся последние 10 лет (Бозкала-1, Бозкала-2, Загазинда). Координаты угловых точек определены GNSS-приёмником смартфона,

импортированы в ГИС в виде полигонов и использованы для сравнения спектральных характеристик используемых и заброшенных земель.

Результаты

Площадь сельскохозяйственных земель, выделенная по снимкам Sentinel-2 2025 г., составила 410 485 га, тогда как по данным официальной статистики – 408 749 га. Расхождение в 0,42 % свидетельствует о корректности маскирования и пригодности данных ДЗЗ для учёта земель на уровне области.

Распределение сельскохозяйственных земель по классам в 1998 и 2025 гг. приведено в таблице 2, а их территориальное размещение – на рисунках 1 и 2.

Таблица 2 – Распределение сельскохозяйственных земель Хорезмской области по степени деградации

Класс земель	**1998 г., га**	**1998 г., %**	**2025 г., га**	**2025 г., %**
Устойчивые	97 071	25,1	111 984	27,5
Средней степени деградации	149 421	38,6	147 689	36,3
Сильно деградированные (выбывшие)	140 202	36,3	147 323	36,2
Всего	386 693	100,0	406 996	100,0

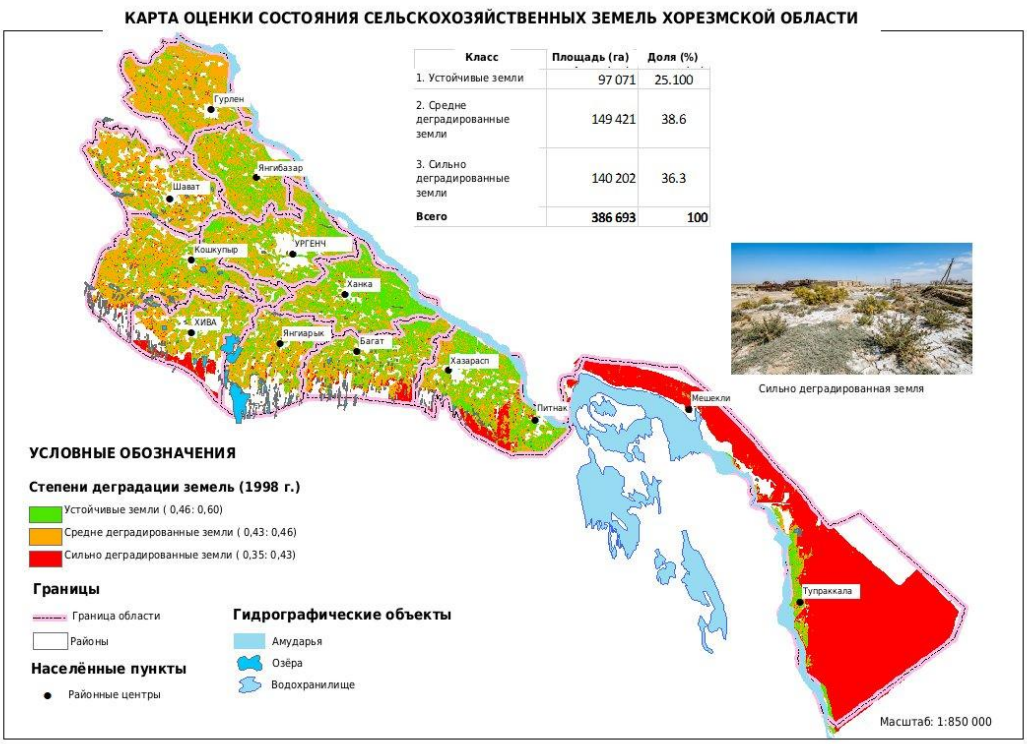


Рисунок 1 – Карта оценки состояния сельскохозяйственных земель Хорезмской области, 1998 г.

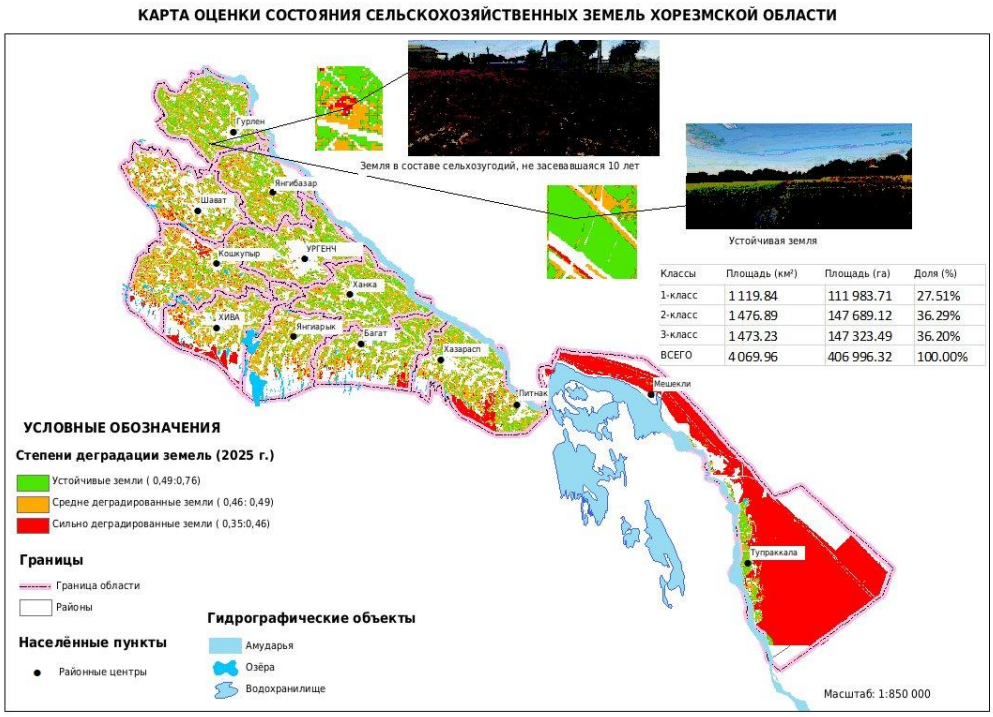


Рисунок 2 – Карта оценки состояния сельскохозяйственных земель Хорезмской области, 2025 г.

В 1998 г. деградированные земли занимали 74,9 % площади, причём сильно деградированные участки были сосредоточены на юге и юго-западе области, у Тупраккалы и в дельтовой части Амударьи. К 2025 г. доля устойчивых земель возросла на 2,4 процентного пункта, что согласуется с проведёнными в последние годы работами по реконструкции коллекторно-дренажной сети. Однако доля сильно деградированных земель практически не изменилась и сохраняется на уровне около 36 %.

Пространственный анализ показал, что выбывшие из оборота земли приурочены к окраинным и труднообеспечиваемым водой массивам Гурленского, Шаватского, Янгибазарского, Хивинского и Янгиарыкского районов, а также к песчаным участкам Хазараспского, Багатского и Питнакского районов. Устойчиво используемые земли тяготеют к Амударье и магистральным каналам. Сопоставление карт NDWI и SI (рисунок 3) выявило устойчивую обратную зависимость: участки с низкой увлажнённостью характеризуются повышенным засолением.

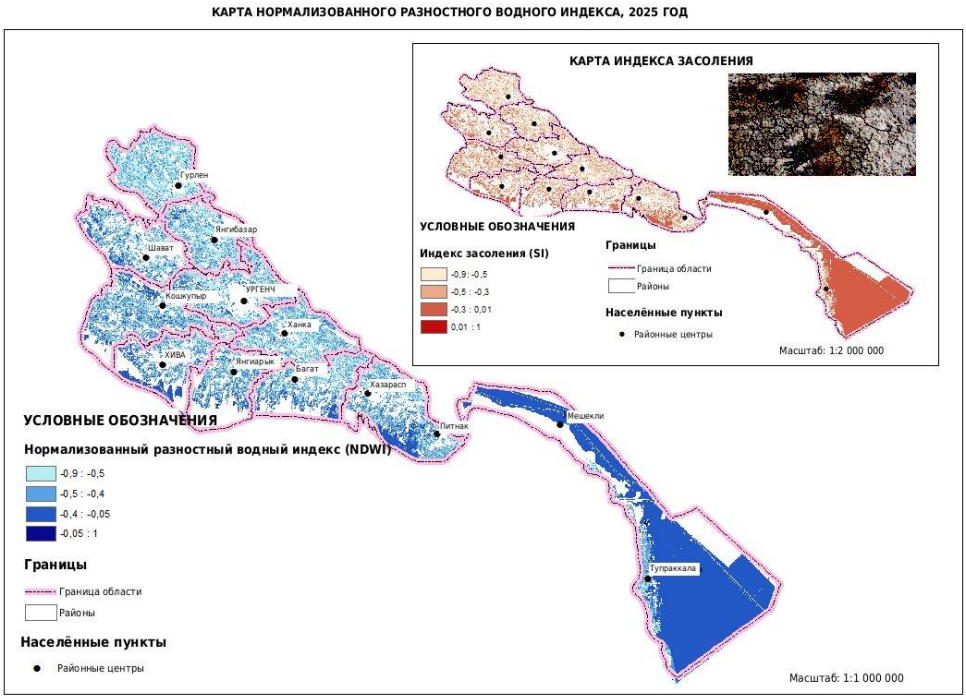


Рисунок 3 – Карты нормализованного разностного водного индекса (NDWI) и индекса засоления (SI), 2025 г.

Результаты дистанционного анализа согласуются со статистическими данными (таблица 3). За 2015–2025 гг. площадь выбывших земель выросла почти в три раза, параллельно увеличилась доля средне- и сильнозасолённых земель и снизился балл бонитета почв.

Таблица 3 – Динамика использования и деградации земель Хорезмской области

Показатель	**2015 г.**	**2020 г.**	**2025 г.**
Орошаемые земли, тыс. га	243,5	239,2	237,5
Земли, выбывшие из оборота, га	1 850	3 920	5 450
Среднезасолённые земли, %	42,1	45,3	48,7
Сильнозасолённые участки, %	12,4	15,8	18,2
Бонитет почв, балл	54	51	48

Детальный анализ на примере Халкабадского массива в масштабе 1:100 000 показал, что площадь участков с изменением NDVI составила 15 км² в 2022–2023 гг., 12 км² в 2023–2024 гг. и 13 км² в 2024–2025 гг. Колебательный характер этих изменений указывает на высокую чувствительность земель массива к условиям водообеспечения.

Обсуждение

Главный методический вывод исследования связан с ограничениями NDVI. Индекс реагирует на любую зелёную биомассу [5] и не отличает посевы от сорной и дикой растительности, быстро занимающей заброшенные поля. Поэтому для регионов, где выбытие земель вызвано засолением и дефицитом воды, более информативны индексы, непосредственно характеризующие эти процессы. Использование NDWI и SI позволило получить реалистичную картину, подтверждённую совпадением площадей со статистикой и полевыми полигонами.

Полученная доля деградированных земель (около 72 % в 2025 г.) выше оценок, основанных на трендах NDVI [3], и доли заброшенных земель по данным MODIS [4]. Различие объясняется тем, что в настоящей работе к

деградированным отнесены и земли средней степени, которые продолжают использоваться, но имеют пониженную продуктивность. Ограничениями методики являются различие сенсоров в разные годы и обобщённость классификации для территории всей области; для практического применения рекомендуется дополнять её картами крупного масштаба для отдельных массивов.

Заключение

1. Выбытие земель из сельскохозяйственного оборота в Хорезмской области обусловлено прежде всего вторичным засолением, близким залеганием грунтовых вод и дефицитом поливной воды; за 2015–2025 гг. площадь таких земель увеличилась с 1 850 до 5 450 га.

2. В условиях залежей, зарастающих дикой растительностью, NDVI завышает площадь выбывших земель; интегральный индекс на основе NDWI и SI с равными весами обеспечивает более достоверную оценку.

3. В 2025 г. устойчивые земли занимают 27,5 % сельскохозяйственных угодий области, а земли средней и сильной степени деградации – по 36 %; выбывшие земли сосредоточены на окраинных, удалённых от дренажной сети массивах.

4. Для возвращения земель в оборот рекомендуется дифференцировать мероприятия по степени засоления (промывки и севооборот на слабозасолённых землях, реконструкция дренажа и гипсование на среднезасолённых, фитомелиорация на сильнозасолённых), а также создать на основе предложенной методики электронный реестр выбывших земель с ежегодным обновлением по снимкам Sentinel-2.

Использованные источники:

1. Земельный кодекс Республики Узбекистан от 30.04.1998 (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]. – URL: https://lex.uz/ru/docs/149947

2. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан от 14.01.2022 № 22 «Об утверждении нормативно-правовых актов, регулирующих проведение работ по мониторингу, охране земель и землеустройству на землях сельскохозяйственного назначения» [Электронный ресурс]. – URL: https://lex.uz/docs/5827241

3. Dubovyk O., Menz G., Conrad C., Kan E., Machwitz M., Khamzina A. Spatio-temporal analyses of cropland degradation in the irrigated lowlands of Uzbekistan using remote-sensing and logistic regression modeling // Environmental Monitoring and Assessment. – 2013. – Vol. 185, No. 6. – P. 4775–4790. – DOI: 10.1007/s10661-012-2904-6

4. Löw F., Prishchepov A.V., Waldner F., Dubovyk O., Akramkhanov A., Biradar C., Lamers J.P.A. Mapping cropland abandonment in the Aral Sea Basin with MODIS time series // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10, No. 2. – Art. 159. – DOI: 10.3390/rs10020159

5. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. NASA SP-351. – Washington, 1974. – Vol. 1. – P. 309–317.

6. McFeeters S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // International Journal of Remote Sensing. – 1996. – Vol. 17, No. 7. – P. 1425–1432. – DOI: 10.1080/01431169608948714

7. Khan N.M., Rastoskuev V.V., Sato Y., Shiozawa S. Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators // Agricultural Water Management. – 2005. – Vol. 77. – P. 96–109.

8. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process. – New York: McGraw-Hill, 1980. – 287 p.

9. Drusch M., Del Bello U., Carlier S. et al. Sentinel-2: ESA’s optical high-resolution mission for GMES operational services // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 120. – P. 25–36. – DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.026

10. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. – 2017. – Vol. 202. – P. 18–27. – DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031