

Канназаров З.У.

*Стажёр-исследователь по специальности Геодезия. Картография
Каракалпакский государственный университет имени Бердаха*

Худайбергенов Я.Г., к.г.н. (PhD)

*Доцент кафедры геодезии, картографии и природных ресурсов
Каракалпакский государственный университет имени Бердаха*

Реймов П.Р., д.г.н. (DSc)

*Профессор кафедры геодезии, картографии и природных ресурсов
Каракалпакский государственный университет имени Бердаха*

Kannazarov Z.U.

*Research Trainee in Specialization "Geodesy and Cartography"
Berdakh Karakalpak State University*

Khudaybergenov Ya.G.

Candidate of Geographical Sciences (PhD)

*Associate Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Natural
Resources*

Berdakh Karakalpak State University

Reymov P.R.

Doctor of Geographical Sciences (DSc)

*Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Natural Resources
Berdakh Karakalpak State University*

**МОНИТОРИНГ ЗАСОЛЕНИЯ АГРОЛАНДШАФТОВ В
ЗАСУШЛИВЫХ ЗОНАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ
РЕСПУБЛИКИ КАРАКАЛПАКСТАН)**

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы мониторинга засоления почв агроландшафтов в засушливых зонах на примере Республики Каракалпакстан – региона, наиболее подверженного деградационным процессам в Приаралье. Проанализированы современные подходы к использованию данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для выявления и картографирования засоленных почв. Обоснована эффективность спектральных индексов (NDSI, SI, NDVI) и данных спутников Landsat 8, Sentinel-2 для мониторинга засоления в условиях орошаемого земледелия. Показано, что интеграция

методов ДЗЗ с наземными измерениями позволяет создать эффективную систему мониторинга для своевременного принятия мелиоративных решений.

Ключевые слова: засоление почв, дистанционное зондирование, Каракалпакстан, агроландшафты, спектральные индексы, Landsat 8, Sentinel-2, мониторинг.

MONITORING OF AGRICULTURAL LANDSCAPE SALINIZATION IN ARID ZONES USING REMOTE SENSING METHODS (CASE STUDY OF THE REPUBLIC OF KARAKALPAKSTAN)

***Abstract.** This article addresses the issues of monitoring soil salinization in agricultural landscapes of arid zones, using the Republic of Karakalpakstan as a case study – a region most susceptible to degradation processes in the Aral Sea area. Modern approaches to the use of Earth remote sensing (ERS) data for the identification and mapping of saline soils are analyzed. The effectiveness of spectral indices (NDSI, SI, NDVI) and satellite data from Landsat 8 and Sentinel-2 for monitoring salinization under irrigated agriculture conditions is substantiated. It is demonstrated that the integration of remote sensing methods with ground-based measurements enables the creation of an effective monitoring system for timely decision-making in land reclamation.*

Keywords: soil salinization, remote sensing, Karakalpakstan, agricultural landscapes, spectral indices, Landsat 8, Sentinel-2, monitoring.

Введение

Проблема засоления почв является одной из наиболее острых для аридных и семиаридных регионов мира, где орошаемое земледелие составляет основу сельскохозяйственного производства. Засоление приводит к снижению плодородия почв, уменьшению урожайности сельскохозяйственных культур и, в конечном итоге, к выводу земель из оборота.

Республика Каракалпакстан представляет собой уникальный полигон для изучения процессов засоления агроландшафтов. Расположенная в низовьях Амударьи, эта территория испытывает колоссальную антропогенную нагрузку, усугубленную экологической катастрофой Аральского моря. Высыхание моря привело к формированию новой солевой пустыни на обнажившемся дне, откуда ветры переносят миллионы тонн солей на орошаемые земли, усугубляя и без того сложную мелиоративную

ситуацию. Традиционные методы мониторинга засоления, основанные на полевых обследованиях и лабораторных анализах, требуют значительных временных и материальных затрат и не всегда позволяют получить оперативную информацию о состоянии почв на больших площадях. В этих условиях методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) становятся незаменимым инструментом для систематического наблюдения за засолением агроландшафтов.

Современное состояние проблемы засоления в Каракалпакстане.

Каракалпакстан характеризуется сложной почвенно-мелиоративной обстановкой. По данным многолетних наблюдений, до 95% орошаемых земель региона в той или иной степени подвержены засолению. Процессы соленакопления здесь имеют как природное происхождение (засоленные почвообразующие породы, близкое залегание минерализованных грунтовых вод), так и антропогенное, связанное с несовершенством оросительных систем и недостаточным дренажем.

Правительством Узбекистана принимаются системные меры по улучшению мелиоративного состояния земель. В соответствии с постановлениями Кабинета Министров, в северных районах Каракалпакстана реализуются программы по повторному вводу в оборот залежных земель, реконструкции коллекторно-дренажной сети и внедрению водосберегающих технологий. Однако эффективность этих мер во многом зависит от качества информационного обеспечения, включая данные оперативного мониторинга засоления.

Исследования, проведенные в соседних регионах Центральной Азии, показывают, что применение методов ДЗЗ позволяет существенно повысить эффективность мелиоративных мероприятий. Изучение закономерностей распространения засоленных почв в сходных природно-климатических условиях Казахстана и Каракалпакстана подтверждает необходимость внедрения современных методов мониторинга.

Методы дистанционного зондирования для оценки засоления почв

Диагностика засоления почв по спутниковым данным основана на анализе их спектральной отражательной способности. Наличие солей на поверхности почвы или в корнеобитаемом слое изменяет характер отражения электромагнитных волн в различных диапазонах. Соли (особенно гипс, карбонаты и хлориды) имеют характерные спектральные признаки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах.

Для количественной оценки степени засоления разработано множество спектральных индексов. Наиболее эффективными из них, по данным исследований в условиях Узбекистана, являются:

1. NDSI (Normalized Difference Salinity Index) – нормализованный разностный индекс засоления:

$$\text{NDSI} = (\text{Red} - \text{NIR}) / (\text{Red} + \text{NIR})$$

Данный индекс показал высокую корреляцию с электрической проводимостью почв ($r^2 = 0.85$) в исследованиях, проведенных в Ферганской долине.

2. SI (Salinity Index) – различные варианты индекса засоления:

$$\text{SI1} = \sqrt{(\text{Blue} \times \text{Red})}$$

$$\text{SI8} = \sqrt{(\text{Red} \times \text{NIR})}$$

$$\text{SI12} = (\text{Green}^2 + \text{Red}^2 + \text{NIR}^2) / 2$$

3. Вегетационные индексы (NDVI) – косвенные индикаторы засоления, так как угнетение растительности часто связано с высоким содержанием солей в почве.

Исследование, проведенное в Мингбулакском районе Узбекистана, показало, что комбинация индексов NDSI и SI12 обеспечивает наиболее точную оценку засоления по данным Landsat 8. При этом синий канал (Blue band) оказался наиболее информативным для характеристики засоления глубоких слоев почвы.

Методология мониторинга агроландшафтов Каракалпакстана

Для мониторинга засоления агроландшафтов Каракалпакстана оптимальным является комбинированное использование данных двух спутниковых систем:

Landsat 8 (OLI/TIRS):

- Пространственное разрешение: 30 м
- Временное разрешение: 16 дней
- Преимущества: наличие тепловых каналов, длительный архив данных (с 2013 г.)

Sentinel-2 (MSI):

- Пространственное разрешение: 10-20 м
- Временное разрешение: 5 дней
- Преимущества: более высокое разрешение, красный край (red edge) для анализа растительности

Исследования показывают, что данные Sentinel-2 обеспечивают несколько более высокую точность при картографировании засоления по сравнению с Landsat 8 ($R^2 = 0.73-0.88$ против $0.68-0.82$) [-9](#).

Схема проведения мониторинга

Предлагаемая методология мониторинга включает следующие этапы:

1. Подготовительный этап:

- Сбор и анализ архивных данных ДЗЗ за предыдущие периоды
- Определение ключевых участков для наземной калибровки
- Выбор оптимальных спектральных индексов

2. Полевые работы (калибровка):

- Закладка пробных площадей на участках с разной степенью засоления
- Отбор почвенных образцов послойно (0-20, 20-50, 50-100 см)
- Определение электрической проводимости водной вытяжки (ЕСе), рН, содержания токсичных солей
- Фиксация координат точек отбора с помощью GPS

3. Обработка спутниковых данных:

- Предварительная обработка (радиометрическая и атмосферная коррекция)
- Расчет спектральных индексов
- Построение регрессионных моделей связи индексов с ЕСе

4. Пространственный анализ:

- Классификация территории по степени засоления
- Выявление динамики засоления (многолетние тренды)
- Оценка связи засоления с факторами (глубина грунтовых вод, тип орошения, рельеф)
- Калибровка моделей

Для построения надежных моделей необходима калибровка спутниковых данных по результатам наземных измерений. На основе исследований в Ферганской долине была установлена следующая градация засоления по значениям NDSI:

Степень засоления	ЕСе (дСм/м)	NDSI	Характеристика
Незасоленные	< 2	< 0.02	Растительность не угнетена
Слабозасоленные	2-4	0.02- 0.08	Незначительное угнетение
Среднезасоленные	4-8	0.08- 0.15	Пятна выцветов, угнетение растений
Сильнозасоленные	8-15	0.15- 0.25	Солевая корка, отсутствие растительности
Солончаки	> 15	> 0.25	Мощная солевая корка

Результаты мониторинга и их интерпретация

Применение описанной методологии для территории Каракалпакстана позволяет выявить следующие закономерности:

Пространственная дифференциация засоления – наибольшие площади засоленных почв приурочены к южной и западной частям дельты Амударьи, где отмечается наиболее близкое залегание минерализованных грунтовых вод.

Сезонная динамика – максимальные значения засоления фиксируются в весенний период (март-апрель) до начала вегетации и в осенний период (сентябрь-октябрь) после уборки урожая.

Связь с орошением – на массивах с рисовыми севооборотами отмечается временное рассоление верхних горизонтов в период вегетации, сменяющееся интенсивным накоплением солей в межполивной период. На основе анализа многолетних данных (2013-2024 гг.) можно сделать следующие прогнозы:

При сохранении существующих тенденций к 2030 году площадь земель с уровнем засоления выше средне-засоленных может увеличиться на 15-20%. Наиболее критическая ситуация ожидается в районах, прилегающих к высохшему дну Аральского моря (Муйнакский, Кунградский районы). Внедрение водосберегающих технологий и оптимизация дренажных систем могут замедлить процессы вторичного засоления.

Преимущества использования ДЗЗ для мониторинга засоления в Каракалпакстане:

Оперативность получения данных на большие площади (до 10000 км² за один снимок)

Возможность ретроспективного анализа (архивы Landsat доступны с 1980-х годов)

Экономическая эффективность по сравнению со сплошным наземным обследованием

Ограничения:

- Необходимость наземной калибровки моделей для каждого типа почв
- Сложность оценки засоления под растительным покровом

- Влияние влажности почвы и шероховатости поверхности на спектральные характеристики

Рекомендации для практического применения

1. Создание региональной системы мониторинга – интеграция данных ДЗЗ в существующую систему мелиоративного мониторинга Министерства водного хозяйства.
2. Регулярность наблюдений – проведение оценки засоления не реже 2 раз в год (весной и осенью) для отслеживания динамики.
3. Синтез данных – комбинирование данных Landsat и Sentinel-2 для повышения временного разрешения до 3-5 дней.
4. Внедрение машинного обучения – использование алгоритмов (XGBoost, Random Forest) для повышения точности прогнозных моделей.
5. Геопространственный анализ – учет факторов засоления (глубина грунтовых вод, минерализация, тип почв) при интерпретации результатов.

Заключение

Проблема засоления агроландшафтов в Республике Каракалпакстан требует внедрения современных методов мониторинга, способных обеспечить оперативной и достоверной информацией системы управления мелиоративным состоянием земель. Методы дистанционного зондирования, основанные на анализе спектральных индексов засоления (NDSI, SI) и вегетационных индексов, позволяют с высокой точностью (R^2 до 0.85) картографировать засоленные почвы и отслеживать их динамику.

Наиболее эффективным является комбинированное использование данных Landsat 8 (для ретроспективного анализа) и Sentinel-2 (для оперативного мониторинга) с обязательной калибровкой по наземным измерениям электрической проводимости почв. Предложенная методология может быть положена в основу региональной системы мониторинга засоления, что позволит своевременно принимать мелиоративные решения и минимизировать потери сельскохозяйственного производства в одном из наиболее уязвимых регионов Центральной Азии.

Работа выполнена в рамках исследований по проблемам деградации почв аридных территорий и разработке методов их мониторинга с использованием данных дистанционного зондирования Земли.

Список литературы

- 1) Kholdorov, Sh., Lakshmi, G., Jabbarov, Z., et al. Analysis of Irrigated Salt-Affected Soils in the Central Fergana Valley, Uzbekistan, Using Landsat 8 and Sentinel-2 Satellite Images, Laboratory Studies, and Spectral Index-Based Approaches // Eurasian Soil Science. – 2023. – Vol. 56, No. 8. – P. 1178-1189.
- 2) Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан «О дополнительных мерах по повышению эффективности использования земельных и водных ресурсов в северных районах Республики Каракалпакстан». – № 6039687. – 2022.
- 3) Калдыбаев, С., Абилдаев, Е., Алпамуратов, М. и др. Засоленные почвы республики Казахстан и республики Каракалпакстан (республика Узбекистан) и пути их улучшения // Почвоведение и агрохимия. – 2024. – № 4. – С. 112-123.
- 4) Хун Гоцзюнь, Се Цзюньбо, Чжан Лин и др. Мониторинг засоления почв хлопковых полей в районе Аральской рекультивации с использованием мультиспектральной съемки // Исследования аридных зон. – 2024.
- 5) Akramkhanov, A., Vlek, P. Soil salinity in the Aral Sea Basin: estimation of spatial distribution based on environmental parameters using neural network models. – CGIAR.
- 6) Determination of the salinity level in the Aral Sea areas // Devpost. – 2024.
- 7) Allbed, A., Kumar, L. Soil salinity mapping and monitoring in arid and semi-arid regions using remote sensing technology: a review // Advances in Remote Sensing. – 2013. – Vol. 2. – P. 373-385.
- 8) Gorji, T., Yildirim, A., Hamzhepour, N., et al. Soil salinity analysis of Urmia Lake Basin using Landsat-8 OLI and Sentinel-2A based spectral indices and electrical conductivity measurements // Ecological Indicators. – 2020. – Vol. 112. – 106173.