



УДК: 631.4

## УЗБЕКИСТАН КАК МОДЕЛЬНЫЙ РЕГИОН АРАЛЬСКОГО БАССЕЙНА В УГЛЕРОДНОЙ ПОВЕСТКЕ: ПОЧВЫ, ДЕГРАДАЦИОННЫЕ РИСКИ, MRV И CDR-РЕШЕНИЯ

**Юртаев Андрей Александрович** 

профессор, канд. геогр. наук

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

e-mail: [a.a.yurtaev@utmn.ru](mailto:a.a.yurtaev@utmn.ru)

**Шварцева Ольга Сергеевна** 

вед. науч. сотр., канд. геол.-мин. наук,

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

e-mail: [o.s.shvarceva@utmn.ru](mailto:o.s.shvarceva@utmn.ru)

**Гафурова Лазиза Акрамовна** 

профессор, доктор биол. наук

Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

e-mail: [glazizakhon@bk.ru](mailto:glazizakhon@bk.ru)

**Аннотация.** Узбекистан концентрирует ключевые элементы углеродной и деградационной повестки Аральского бассейна: интенсивное орошение с риском вторичного засоления (>60% орошаемых земель), деградацию пастбищ, узбекистанскую часть Аралкума как региональный источник пыле-солевых бурь, трансформированные дельтовые и тугайные геосистемы. Обсуждаются углеродный статус почв, механизмы каскада «вода — соль — растительность — углерод», политика NDC 3.0 и барьеры реализации, контур минимально достаточной MRV и портфель SLM/CDR-решений по пяти ландшафтным сценам. Сквозной принцип: SOC-ориентированные цели не должны предшествовать стабилизации базового ландшафтного узла.

**Ключевые слова:** Узбекистан, Аральский бассейн, SOC, SIC, засоление, Аралкум, MRV, CDR, NDC 3.0.

**Abstract.** Uzbekistan concentrates the core elements of the Aral Basin carbon and degradation agenda: intensive irrigation with secondary-salinization risk (>60% of irrigated land), rangeland degradation, the Aralkum as a regional SDS source, and transformed delta and tugai geosystems. The paper covers soil carbon status, the water-salt-vegetation-carbon cascade, NDC 3.0 policy and implementation barriers, a minimally sufficient MRV framework, and a SLM/CDR portfolio across



## AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

five landscape scenes. Cross-cutting principle: SOC-oriented targets must not precede stabilization of the baseline landscape nexus.

**Keywords:** Uzbekistan, Aral Sea Basin, SOC, SIC, salinization, Aralkum, MRV, CDR, NDC 3.0.

**Annotatsiya.** O'zbekiston Orol havzasining karbon va yer degradatsiyasi kun tartibining asosiy unsurlarini o'zida mujassamlashtiradi: ikkilamchi sho'rlanish xavfi yuqori sug'oriladigan yerlar (60%+), yaylovlar degradatsiyasi, Orolqum tuzchang bo'ronlari manbai sifatida, delta va to'qay ekotizimlari. Tuproq karbon holati, degradatsion kaskad, NDC 3.0 siyosati, minimal MRV tizimi va beshta landshaft sahnasi bo'yicha SLM/CDR portfeli muhokama etiladi.

**Kalit so'zlar:** O'zbekiston, Orol havzasi, SOC, SIC, sho'rlanish, Orolqum, MRV, CDR, NDC 3.0.

### ВВЕДЕНИЕ

Узбекистан выступает модельной территорией Аральского бассейна: все пять ландшафтных сцен — орошаемые земли низовий Амударьи и Сырдарьи, пастбища Кызылкума и Устюрта, дельтовые и тугайные геосистемы, узбекистанская часть Аралкума и горно-предгорные водосборы — представлены в полном объёме [1–3]. Определяющие факторы: (1) >60% орошаемых земель подвержены вторичному засолению [4]; (2) наличие NDC 3.0 с целями по парниковым газам (ПГ) к 2035 г. и пробелами в MRV [5]; (3) высокая доля сельского населения, зависящей от деградирующих угодий. Почвы — преимущественно сероземы, такыры и пустынные песчаные — характеризуются низким SOC и высокой уязвимостью к солевому и эрозионному стрессу [6, 7].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Аналитический синтез региональных данных: нормативные документы (NDC 3.0, UNEP, Всемирный банк, IFAS), рецензируемые публикации по SOC/SIC и SDS, данные ДЗЗ (Sentinel-1/2, Landsat 8/9), полевые материалы соавторов по пяти сценам. Методы: ландшафтная стратификация; картирование ЕС, pH, BD, SOC, SIC, NDVI, NPP; построение контура MRV на основе EO/RS-скрининга и наземных реперных пунктов; типизация SLM/CDR-пакетов с оценкой потенциала секвестрации.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### 1. Углеродный статус почв и ключевые риски

Выделяются пять ландшафтных сцен с различным доминирующим риском и потенциалом восстановления (табл. 1). Технический потенциал секвестрации варьирует от ~0.5–1.0 Mg C га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup> в орошаемых системах до близкого к нулю в Аралкуме [8, 9].





Таблица 1.

**Пять ландшафтных сцен Узбекистана: доминирующий риск, С-потенциал и приоритетные меры.**

Сцена	Доминирующий риск	С-потенциал, Mg C га <sup>-1</sup> год <sup>-1</sup>	Приоритетные меры
Орошаемые земли	Вторичное засоление; Na <sup>+</sup> ; падение продуктивности	0.5–1.0	Дренаж; солевой контроль; агролесомелиорация
Пастбища	Перевыпас → деградация → эрозия	0.1–0.2	Ограничение нагрузки; ротация; восстановление покрова
Дельты и тугай	Осушение; засоление; утрата биоразнообразия	0.3–0.6	Экологические попуски; восстановление тугая
Аралкум	SDS; эрозия лёгкоразвеваемых песков	≈0	Посадки саксаула; барьеры; фитомелиорация
Горные водосборы	Водная эрозия; дегумификация	0.25–1.0	Контурная обработка; залужение; защитные посадки

**1.1. Засоление, SDS, эрозионные потери**

Более 60% орошаемых земель засолены; снижение урожайности чувствительных культур — 15–80% [4, 10]. С осушённого дна Аральского моря ежегодно выносятся 15–75 млн т материала с тяжёлыми металлами (Cd, Zn, Cu) и ростом респираторной заболеваемости [11, 12]. В сероземах Ташкентской области пористость пахотного горизонта эродированных профилей снижается с 52% до 47.5% [13].

**1.2. Потери SOC вдоль градиентов деградации**

В бассейне Амударьи потери SOC (0–50 см) составляют ~52% (2.94 → 1.40 г кг<sup>-1</sup>); при переходе к тяжёлому опустыниванию потери в слое 0–40 см достигают ~58% [14]. Конверсия целины в пашню — 33–66% исходного пула (10–40 Mg C га<sup>-1</sup>) [15]. Интенсивный выпас снижает запасы до 19–23 Mg C га<sup>-1</sup> (~45–50%) [15].

**1.3. SOC vs. SIC и дефляционный риск Аралкума**

В карбонатных почвах SOC и SIC демонстрируют разнонаправленную динамику: засоление угнетает SOC, тогда как Ca и Mg способствуют аккумуляции SIC [16]; до 80% SIC залегает ниже 1 м. В узбекистанской части Аралкума основной вклад в потерю углерода вносит дефляционный вынос верхнего слоя: за 20 лет потеряно ~2.1 млн т почвенного углерода [12]. Приоритет — стабилизация поверхности, а не максимизация SOC.



## AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

### 2. Деградационный каскад: вода — соль — растительность — углерод

В орошаемом секторе избыток ирригации без дренажа ведёт к подъёму минерализованных грунтовых вод и вторичному засолению; дегумификация → уплотнение → снижение инфильтрации → дальнейшее соленакопление [17]. Без контроля засоления (ЕС), уровня грунтовых вод (УГВ) и плотности сложения почв (BD) no-till и мульчирование не дают ожидаемого SOC-эффекта [4, 6]. На пастбищах перегрузка выпаса снижает наземную фитомассу на ~42%, подземную — на ~28%; скорости восстановления SOC — ~0.05–0.2 Mg C га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup> [9, 18]. В Аралкуме накопление SOC невозможно без предварительной стабилизации поверхности [12].

### 3. NDC 3.0 и барьеры реализации

NDC 3.0 формулирует цель по снижению удельной эмиссии ПГ/ВВП к 2035 г. (относительно 2010 г.) [5]. LDN применим как сквозной инструмент сопоставления покрова, продуктивности и SOC, однако требует регулярных наземных обследований [19]. В Приаралье (<100 мм/год) долговременность эффектов восстановления особенно проблематична [20]: SOC не может быть основным KPI до стабилизации водного баланса поверхности.

### 4. Минимально достаточная MRV

Принцип минимальной достаточности критичен для аридных условий: высокая пространственная изменчивость и низкие темпы аккумуляции делают сплошные измерения нецелесообразными [21, 22]. Базовый набор индикаторов — в табл. 2. Системные ошибки: отсутствие BD (невозможен пересчёт концентраций в запасы); игнорирование ЕС; ограничение глубиной 0–30 см; исключение SIC. Рациональная схема: EO/RS-скрининг (Sentinel/Landsat) + наземная калибровочная сеть; ML-модели дают R<sup>2</sup> ~0.8 для ЕС и 0.6–0.8 для SOC [23, 24].

Таблица 2.

Базовый набор индикаторов MRV для аридных земель Узбекистана.

Индикатор	Единицы	Комментарий
Запасы SOC	Mg C га <sup>-1</sup> (0–1 м)	>50% SOC в метровом профиле может находиться ниже 30 см
Запасы SIC	Mg C га <sup>-1</sup> (0–1 м)	До 80% SIC залегает ниже 1 м; учитываются отдельно от SOC
Объёмная масса (BD)	г см <sup>-3</sup>	Обязательна для расчёта запасов; без неё невозможен пересчёт
ЕС почвенной вытяжки	дСм м <sup>-1</sup>	«Фильтр» интерпретации для орошаемых и засоленных систем
Влажность и УГВ	м <sup>3</sup> м <sup>-3</sup> ; м	Водный режим; риск вторичного засоления
NDVI / LAI / NPP	—	Прокси продуктивности и покрова (EO/RS-скрининг)



### 5. Портфель CDR/SLM-решений по сценариям

**Орошаемый сектор.** CA-принципы должны быть сопряжены с управлением водно-солевым режимом: реабилитация дренажа и повышение WUE предшествуют органическому накоплению [25]. На засоленных почвах Бухарской области no-till обеспечил прирост гумуса с 1.055% до 1.160% за 4 года (+9.95%) [25]. Глобальный технический потенциал CA —  $\sim 0.26\text{--}0.53 \text{ Mg C га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ ; без дренажа недостижим.

**Пастбища, Аралкум, дельта, горы.** Пастбищный пакет: ограничение нагрузки, ротация, водопойная инфраструктура, древесно-кустарниковый компонент. Для Приаралья — одновременное формирование покрова (саксаул + травостой); барьеры снижают эрозию  $\sim$ на 57% [11]; ключевые KPI — снижение частоты SDS и  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ . В дельте Амударьи SOC в древесных насаждениях Хорезма —  $\sim 29.9 \text{ Mg C га}^{-1}$ , в тугае —  $\sim 21.4 \text{ Mg C га}^{-1}$ , полный пул экосистемы —  $\sim 92.6 \text{ Mg C га}^{-1}$  [26]. В горных водосборах приоритет — эрозионный контроль и восстановление арчовых насаждений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Узбекистан выступает модельной территорией для цепочки «стратификация → MRV → CDR/SLM → верификация». Сквозной принцип: приоритет стабилизации ландшафтного узла (водно-солевой режим, почвенно-растительный покров, эрозионный контроль) по отношению к углеродным целям; только после этого меры CDR и прирост SOC становятся реалистичными и измеримыми. Минимально достаточная MRV строится на профильной оценке SOC и SIC с обязательным BD, мониторинге ЕС и водного режима, EO/RS-метриках покрова при калибровке по наземным пунктам.

Максимизация вклада в региональную углеродную архитектуру: (1) стандартизация MRV с интеграцией в платформу IFAS; (2) сеть полевых углеродных площадок по пяти сценариям; (3) CDR-практики (no-till, cover-stopping, биочар, агролесомелиорация) с привязкой к верифицированным приростам SOC; (4) сопряжение мер в Аралкуме и дельте с мониторингом SDS-рисков. Это позволяет рассматривать Узбекистан как полигон для воспроизводимой модели управления почвами, водой и углеродом в аридном поясе Центральной Азии.

**Финансирование:** исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта "Тюменский карбоновый полигон" (FEWZ-2024-0016).

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Harriman, L. (2014). The future of the Aral Sea lies in transboundary cooperation. *WMO Bulletin*, 63(1), 6–9.
2. UNEP. (2025). Atlas of environmental change of the Republic of Uzbekistan. <https://www.unep.org/>
3. Berdimbetov, T., et al. (2021). Identifying land degradation and its driving factors in the Aral Sea Basin from 1982 to 2015. *Frontiers in Earth Science*, 9, Art. 666595.
4. Qadir, M., et al. (2009). Salt-induced land and water degradation in the Aral Sea basin. *Natural Resources Forum*, 33(2), 134–149.
5. Republic of Uzbekistan. (2025). Updated NDC 3.0 to 2035. UNFCCC. <https://unfccc.int/>
6. Gafurova, L., & Juliev, M. (2021). Soil degradation problems and foreseen solutions in Uzbekistan. In A. Rosenstock et al. (Eds.), *Regenerative Agriculture* (pp. 59–67). Springer.
7. Lal, R. (2019). Eco-intensification through soil carbon sequestration. *Journal of Soil and Water Conservation*, 74(3), 55A–61A.
8. Lal, R. (2018). Digging deeper: A holistic perspective on SOC sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology*, 24(8), 3285–3301.
9. Lal, R. (2011). Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems. *Food Policy*, 36(S1), S33–S39.
10. Shokri, N., Hassani, A., & Sahimi, M. (2024). Multi-scale soil salinization dynamics. *Reviews of Geophysics*, 62(4), Art. e2023RG000804.
11. Akramkhanov, A., et al. (2021). The value of landscape restoration in Uzbekistan to reduce sand and dust storms from the Aral Seabed. *World Bank*.
12. Issanova, G., et al. (2022). Assessment of the soil cover in the dried Aral seabed. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233, Art. 525.
13. Juliev, M., et al. (2022). Influence of erosion on serozems, Tashkent province, Uzbekistan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1068, Art. 012005.
14. Zhang, P., et al. (2024). Desertification reduces organic carbon content in dryland soils of the Amu Darya Basin. *Land Degradation & Development*, 36(4), 1181–1194.
15. Lal, R. (2004). Carbon sequestration in soils of Central Asia. *Land Degradation & Development*, 15(6), 563–572.
16. Naorem, A., et al. (2022). Soil inorganic carbon as a potential sink in dryland soils. *Agriculture*, 12(8), Art. 1256.
17. FAO & ITPS. (2015). Status of the world's soil resources: Main report. FAO.
18. Wang, Y., & Wesche, K. (2016). Vegetation and soil responses to livestock grazing in Central Asian grasslands. *Biodiversity and Conservation*, 25(12), 2401–2420.



---

## AGRO KIMYO HIMOYA VA O'SIMLIKLAR KARANTINI

---

19. Kust, G., Andreeva, O., & Shklyayeva, D. (2023). Application of the LDN concept for remote monitoring of irrigated areas in Uzbekistan. *Sensors*, 23(14), Art. 6419.
20. Bao, A., et al. (2024). Ecological problems and ecological restoration zoning of the Aral Sea. *Journal of Arid Land*, 16(3), 315–330.
21. Batjes, N. H., et al. (2024). Towards a modular MRV framework for SOC stock change assessment. *Carbon Management*, 15(1), Art. 2410812.
22. Smith, P., et al. (2020). How to measure, report and verify soil carbon change. *Global Change Biology*, 26(1), 219–241.
23. Mukhamediev, R. I., et al. (2023). Soil salinity estimation for South Kazakhstan based on SAR Sentinel-1 and Landsat-8,9 OLI data with ML. *Remote Sensing*, 15(17), Art. 4269.
24. Hassani, A., Smith, P., & Shokri, N. (2024). Negative correlation between soil salinity and SOC variability. *PNAS*, 121(18), Art. e2317332121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2317332121>
25. Nurbekov, A., et al. (2023). Short crop rotation under no-till improves crop productivity and soil quality in salt-affected areas. *Agronomy*, 13(12), Art. 2974.
26. Hbirkou, C., et al. (2011). Reducing topsoil salinity and raising carbon stocks through afforestation in Khorezm, Uzbekistan. *Journal of Arid Environments*, 75(2), 146–155.