

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.452:631.67

doi: 10.31774/2712-9357-2026-16-3-112-132

Проблемы плодородия орошаемых земель в постиндустриальный период развития мелиорации

Михаил Николаевич Лытов¹, Наталья Геннадиевна Круглякова²,
Глеб Александрович Рулев³, Екатерина Владимировна Зинченко⁴,
Софья Васильевна Мельник⁵

^{1, 2, 3, 4, 5}Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия –
филиал Федерального научного центра гидротехники и мелиорации
имени А. Н. Костякова, Волгоград, Российская Федерация

¹LytovMN@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2743-9825>

²Kruglyakova02032013@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-6566-7360>

³G.heroes@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3815-0448>

⁴Kat-str@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9953-2319>

⁵Melnik_S1996@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5802-1339>

Аннотация. Цель: изучение факторов, определяющих риски снижения плодородия орошаемых земель в постиндустриальный период развития мелиорации. **Материалы и методы.** Материалами исследований являются результаты мониторинга орошаемых и сопряженных неорошаемых угодий, для организации которого используются динамические площадки, размещенные на агроландшафтах сухостепной и полупустынной зон Нижнего Поволжья. Всего заложено 15 динамических площадок. В методологическом аспекте в исследовании используются трансект-катенарный метод, сравнение показателей мониторинга в естественной среде и на используемых участках, а также оценка длительных трендов изменения элементов плодородия почвы с учетом антропогенной нагрузки. **Результаты.** В сравнении с естественным фоном содержание органического вещества снижено на 0,20–0,89 % на орошаемых землях и на 0,49–1,48 % на богаре. В опытах с сельскохозяйственными культурами (кукуруза на силос) орошение обеспечивало неотрицательный баланс гумуса (плюс 0,297 т/га), который, однако, оказался ниже, чем на естественном фоне (плюс 0,428 т/га). Скорость разложения растительных остатков (соевая солома) при орошении в сравнении с богарой возрастала в 1,4–2,2 раза. Зональная проблема окарбоначивания пахотного горизонта ухудшает условия водного обмена и актуализирует проблему переуплотнения почвы: от 1,14–1,40 т/куб. м в слое 0–0,30 м до 1,40–1,60 т/куб. м в подпахотных горизонтах. Исследованиями подтвержден тренд перераспределения водорастворимых солей при орошении в более глубокие горизонты. Получены данные, подтверждающие развитие процессов осолонцевания почвы при орошении водой с минерализацией 1,01–1,12 г/л и SAR = 3,1, что в том числе свидетельствует о недостаточности концепции SAR. **Выводы:** проблемы плодородия орошаемых земель в постиндустриальный период развития мелиораций связаны преимущественно с рисками зональной природы, дефицитом баланса органического вещества и необходимостью оптимизации водного режима почвы.

Ключевые слова: орошаемые земли, плодородие, органическое вещество, водный режим, карбонаты, водорастворимые соли, осолонцевание почвы

Источник финансирования: субсидии на выполнение государственного задания № FNFR-2025-0003 за счет средств федерального бюджета.

Сведения о научно-исследовательской работе, по результатам которой публикуется статья: исследование выполнено в рамках государственного задания по теме FNFR-2025-0003 «Мониторинг длительно орошаемых агроландшафтов для прогнозирования их состояния, управления экологической устойчивостью и продуктивностью с использованием цифровых технологий в адаптивных системах земледелия», регистрационный номер: 1022041300043-4-4.1.1.

Для цитирования: Проблемы плодородия орошаемых земель в постиндустриальный период развития мелиорации / М. Н. Лытов, Н. Г. Круглякова, Г. А. Рулев, Е. В. Зинченко, С. В. Мельник // Мелиорация и гидротехника. 2026. Т. 16, № 3. С. 112–132. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-3-112-132>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Problems of irrigated land fertility in the post-industrial period of land reclamation development

Mikhail N. Lytov¹, Natalya G. Kruglyakova², Gleb A. Rulev³,
Ekaterina V. Zinchenko⁴, Sofya V. Melnik⁵

^{1, 2, 3, 4, 5}All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture – branch of the Federal Scientific Center of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, Volgograd, Russian Federation

¹LytovMN@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2743-9825>

²Kruglyakova02032013@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-6566-7360>

³G.heroes@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3815-0448>

⁴Kat-str@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9953-2319>

⁵Melnik_S1996@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5802-1339>

Abstract. Purpose: to study the factors determining the risks of declining irrigated land fertility in the post-industrial period of land reclamation development. **Materials and methods.** The research materials are the results of monitoring irrigated and adjacent non-irrigated lands, for the organization of which dynamic sites located in the agrolandscapes of the dry steppe and semi-desert zones of the Lower Volga region are used. A total of 15 dynamic sites were laid out. In the methodological aspect, the transect-catenar method, comparison of monitoring indicators in the natural environment and on the used sites, as well as an assessment of long-term trends in changes of soil fertility elements, taking into account anthropogenic load, is used. **Results.** Compared with the natural background, the organic matter content is reduced by 0.20–0.89 % on irrigated land and by 0.49–1.48 % on dry lands. In experiments with agricultural crops (corn for silage), irrigation ensured a non-negative humus balance (plus 0.297 t/ha), however, which turned out to be lower than under natural conditions (plus 0.428 t/ha). The decomposition rate of plant residues (soybean straw) under irrigation increased by 1.4–2.2 times compared to dry farming. The zonal problem of carbonation of the arable horizon worsens the conditions of water exchange and actualizes the problem of soil compaction: from 1.14–1.40 t/cub. m in the 0–0.30 m layer to 1.40–1.60 t/cub. m in the subsoil horizons. Research has confirmed the trend of redistribution of water-soluble salts to deeper horizons during irrigation. Data, confirming the development of soil alkalization processes when irrigated with water with a salinity of 1.01–1.12 g/l and a SAR of 3.1, which also indicates the inadequacy of the SAR concept, were obtained. **Conclusions:** fertility problems in irrigated lands in the post-industrial period of land reclamation development are primarily associated with zonal risks, a deficit in the organic matter balance, and the need to optimize the soil water regime.

Keywords: irrigated lands, fertility, organic matter, water regime, carbonates, water-soluble salts, soil alkalization

Funding source: subsidies for the implementation of State Assignment No. FNFR-2025-0003 from the federal budget.

Information about the research work, on the results of which the article is published: the study was carried out within the framework of the State Assignment on the theme FNFR-2025-0003 “Monitoring of long-term irrigated agricultural landscapes to predict their condition, manage environmental sustainability and productivity using digital technologies in adaptive farming systems”, registration number: 1022041300043-4-4.1.1.

For citation: Lytov M. N., Kruglyakova N. G., Rulev G. A., Zinchenko E. V., Melnik S. V. Problems of irrigated land fertility in the post-industrial period of land reclamation development. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2026;16(3):112–132. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-3-112-132>.

Введение. В аридных регионах РФ для устойчивого, высокопродуктивного использования сельскохозяйственных угодий и решения проблемы продовольственной безопасности страны альтернативы орошению нет [1–5]. Без орошения здесь невозможно получить урожай овощей и фруктов, кратно снижается продуктивность и устойчивость получения зерна, урожая масличных и зернобобовых культур, ограничены ресурсы кормопроизводства. Гидромелиорации сегодня являются одними из наиболее ресурсоемких технологий, предполагают глубокое преобразование природной среды и агроландшафтов с целью получения гарантированных и высоких урожаев сельскохозяйственных культур [1, 3]. При этом крайне важно сохранять продуктивное долголетие мелиорированных земель, наращивать почвенный потенциал, как фактор потенциального уровня интенсификации производства, вовремя распознавать и предотвращать развитие негативных процессов, обеспечивать экологическое благополучие территорий.

Индустриальный период развития мелиораций характеризовался высокими темпами ввода мелиорированных земель, наращиванием производственной базы и научно-технического потенциала, направленных на решение проблемы стабильного обеспечения продовольствием населения [6, 7]. Наряду с этим обострялись экологические проблемы. В засушливых природных зонах с развитием орошаемого земледелия наблюдалось почти по-

всеместное повышение уровня грунтовых вод. На наиболее опасных участках развивались процессы вторичного засоления почв [8]. На части мелиорированных земель снижалась продуктивность сельскохозяйственных культур из-за осолонцевания почвенного покрова, заболачивания и развития водной растительности, снижения содержания органического вещества, ухудшения водных и физических свойств почвы. Например, в Волгоградской области площадь орошаемых земель с оценкой «неудовлетворительное мелиоративное состояние» увеличилась с 8,2 % в 1985 г. до 14,2–16,1 % в 1992 г. [9].

С развалом СССР (1991 г.) в силу коренной экономической трансформации, разрушения хозяйственных связей, социальных и политических процессов интерес к мелиорации снизился. Диспаритет цен наиболее сильно ударил по мелиоративной отрасли, фактически орошаемые площади ранее мелиорированных земель стали быстро сокращаться.

Развитие мелиорации в России можно охарактеризовать индустриальным (1966–1992 гг.) и постиндустриальным (с 1992 г. по настоящее время) этапами. В. В. Бородычев и И. И. Конторович [8] на примере Волгоградской области выделяют этап наиболее интенсивного роста орошаемых площадей (1977–1992 гг.), этап сокращения площадей (1993–2010 гг.), этап стабилизации и реинжиниринга с постепенным наращиванием темпов восстановления мелиорированных площадей (с 2010 г. по настоящее время). Реинжиниринг мелиоративной отрасли, восстановление мелиоративного фонда на новом этапе развития должны базироваться на всестороннем анализе и учитывать эколого-мелиоративные риски [10, 11]. Для этого необходимо четкое понимание проблем, с которыми придется столкнуться, и приоритетов, которым необходимо уделить наибольшее внимание.

Цель исследования состоит в изучении факторов, определяющих риски снижения плодородия орошаемых земель в постиндустриальный период развития мелиорации.

Материалы и методы. Объектом исследований являются мелиорированные, длительное время орошаемые агроландшафты, как объекты приложения антропогенных нагрузок, орошаемые земли, как средство производства и основной ресурс при конструировании адаптивных систем орошаемого земледелия.

Для организации мониторинга регулярно орошаемых пахотных земель и пространственно-сопряженных с ними неорошаемых угодий в контурах Манычско-Донской провинции Волго-Донского междуречья используются динамические площадки (ДП), расположенные на территории землепользования ВНИИОЗ (п. Водный, г. Волгоград). Территория относится к сухостепной зоне светло-каштановых почв. В системе местного топологического пространства исследованиями охвачены орошаемые массивы земель и сопряженные территории, включая плакоры, склоны местности, балки и т. д. [12]. Исследования проводятся трансект-катенарным методом и предусматривают стационарное изучение компонентов в агроэкосистеме «воздух – вода – почва – биота» на ДП, размещенных по катене от водораздела до подошвы склона. Всего заложено 10 ДП (ДП1–ДП10). С 2025 г. еще один комплекс ДП системы мониторинга был расположен в условиях полупустынной зоны Волгоградского Заволжья. Динамические площадки размещены на землях интенсивного овощного орошаемого севооборота (ДП11), адаптивного зерно-кормового севооборота (ДП12) и в естественных условиях (зональный фон, ДП13). Еще две ДП (ДП14, ДП15) расположены на территории виноградника. Это геоморфологический район Приволжской возвышенности. Виноградник расположен на нижней террасе правого берега Волгоградского водохранилища, воды которого смягчают жаркий сухой климат региона.

В методологическом аспекте в исследовании используются несколько подходов. Во-первых, это применение трансект-катенарного метода. В частности, динамические площадки ДП1–ДП7 (п. Водный, г. Волгоград)

находятся практически на прямолинейном участке трансекты и включают все элементы агроландшафта на данной водосборной территории. Следующий подход – это сравнение показателей мониторинга в естественной среде и на используемых участках. И третий подход состоит в статистической оценке длительных трендов показателей мониторинга с учетом антропогенной нагрузки.

В числе показателей, характеризующих плодородие орошаемых земель, определяли содержание и баланс органического вещества почвы, формирование типичных профилей влажности, показатели функциональной активности почвы, плотность сложения, содержание карбонатов и солей водной вытяжки, морфометрические характеристики почвы. Содержание органического вещества (гумуса) в почве устанавливали по методу Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-2021). Баланс органического вещества почвы рассчитывали как разницу между приходом с растительными остатками и расходом в результате минерализации¹. Для определения кинетических характеристик гумификации и минерализации органического вещества в почве использованы соответствующие коэффициенты [13]. Общую биологическую активность почвы оценивали по интенсивности разложения полотна методом Е. Н. Мишустина и А. Н. Петровой². Динамику разложения растительных остатков в почве изучали методом капроновых пакетов³. Состав легкорастворимых солей определяли в стандартной водной вытяжке 1 : 5 методом ЦИНАО (ГОСТ 26423-85, ГОСТ 26425-85, ГОСТ 26424-85, ГОСТ 26426-85).

Результаты и обсуждение. Естественные (зональные) почвы в проводимых по трансект-катене исследованиях – светло-каштановые солонцеватые

¹Василько В. П., Сисо А. В., Макаренко С. А. Состояние почвенного плодородия: метод. указания. Краснодар: КубГАУ, 2015. 46 с.

²Гамзаева Р. С. Методология исследования биологической активности почвы. СПб.: СПбГАУ, 2021. 144 с. EDN: FIOBNM.

³Ганжара Н. Ф., Борисов Б. А., Байбеков Р. Ф. Практикум по почвоведению. М.: Агроконсалт, 2002. 280 с. EDN: THKIYV.

среднесуглинистые, на палево-бурых суглинках, с диагностическим горизонтом на глубине 0,23–0,28 м. Мощность гумусового горизонта 0,28–0,30 м.

На производственных участках гумусовый горизонт почвы трансформировался в трехслойный агрогумусовый (пахотный) горизонт под воздействием ежегодных механических обработок [14].

Анализ результатов многолетних наблюдений за содержанием гумуса показал отсутствие значимого тренда в пределах каждого из рассматриваемых участков. На рисунке 1 выборка по динамике содержания гумуса с 2010 по 2025 г. приведена для площадок с длительно орошаемыми землями (ДП1), с временно не орошаемыми землями (ДП2) и на естественном фоне (ДП5), который является контрольным вариантом.

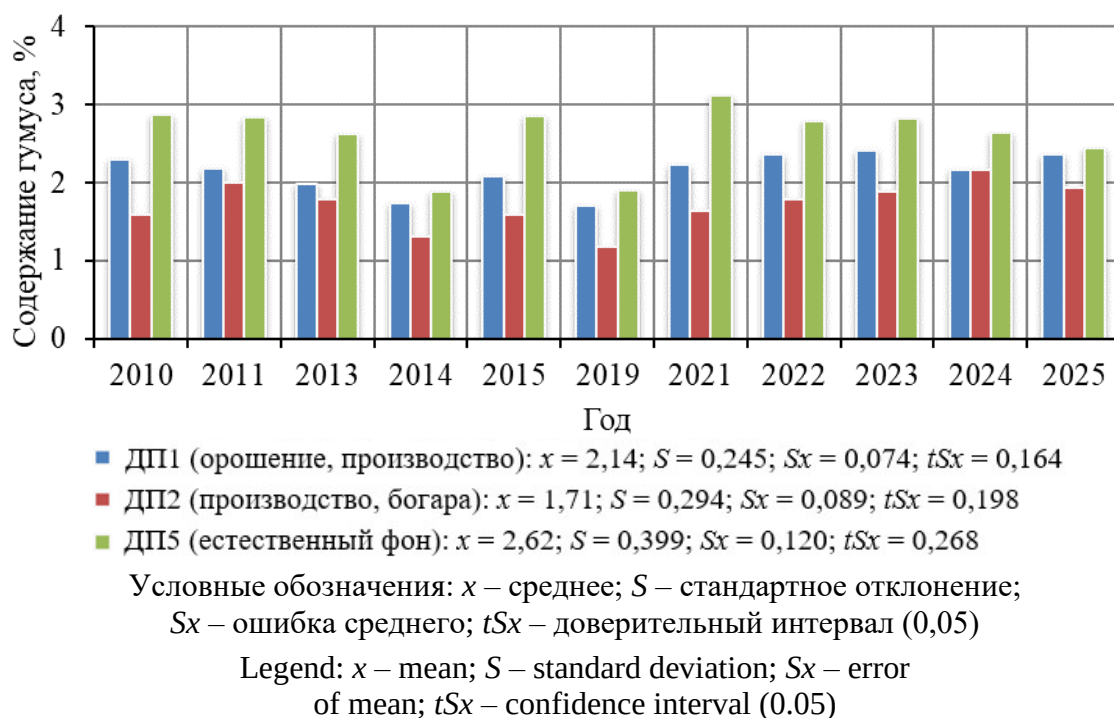


Рисунок 1 – Содержание гумуса в почве на динамических площадках с разными формами хозяйственного использования

Figure 1 – Humus content in soils on dynamic sites with different forms of economic use

В сравнении с естественным фоном содержание гумуса снижено на 0,20–0,89 % на орошаемых землях и на 0,49–1,48 % на богаре. Это может быть связано с усилением процессов минерализации почвенной орга-

ники при распашке, которая не в полной мере возмещается поступлением органического вещества в почву. Отсутствие тренда обусловлено занятием новой экологической ниши для орошаемых (выше) и неорошаемых (ниже) земель соответственно. Характерно, что в условиях орошения органического вещества в почве депонировалось больше, чем в условиях богары. Это подтверждает гипотезу о создании благоприятных условий почвообразования при поддержании научно обоснованных режимов орошения сельскохозяйственных культур. Снижение содержания гумуса в сравнении с естественным фоном определяется балансом минерализации и поступления органических форм (растительных, животных) в почву.

В связи с интенсификацией ростовых процессов и повышением общей биопродуктивности культуры орошаемых агроценозов формируют более привлекательные показатели, связанные с возвратом органического вещества в почву (таблица 1).

Таблица 1 – Основные статьи баланса органического вещества на динамических площадках с разными формами хозяйственного использования, 2025 г.

Table 1 – Main items of the organic matter balance on dynamic sites with different forms of economic use, 2025

Динамическая площадка	Культура	Запас гумуса в слое 0,5 м, т/га	Масса пожнивно-корневых остатков, т/га	Минерализовалось гумуса, т/га	Образовалось гумуса из пожнивно-корневых остатков, т/га	Баланс органического вещества, т/га
ДП1: орошение	Кукуруза на силос	123	5,86	1,169	1,465	+0,297
ДП2: богара	Суданская трава	122	3,81	1,037	0,953	–0,085
ДП5: естественный фон	Степь	140	4,23	0,630	1,058	+0,428
ДП8: богара	Травосмесь	144	4,89	0,648	1,223	+0,575

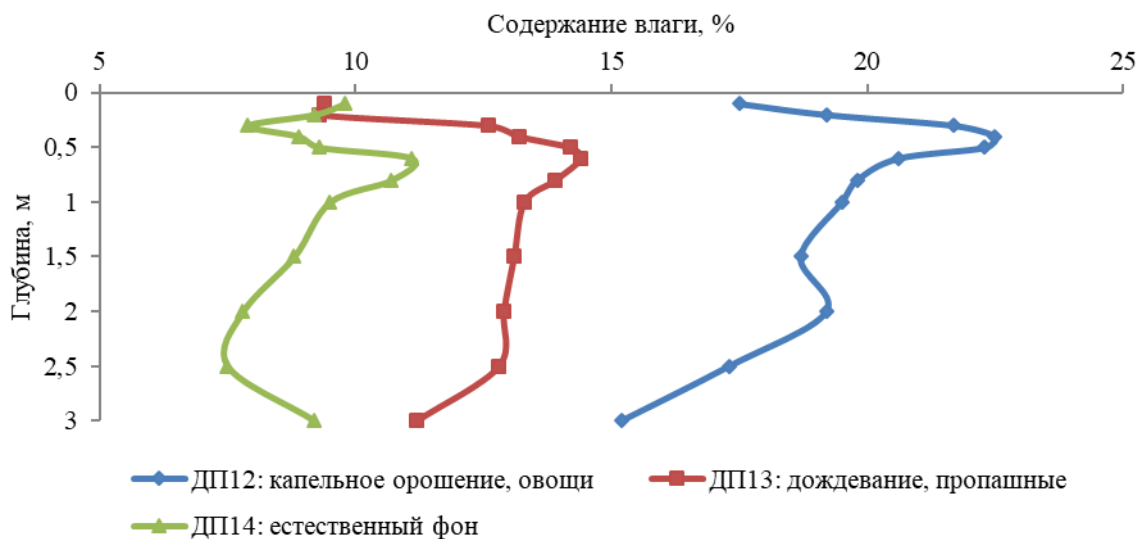
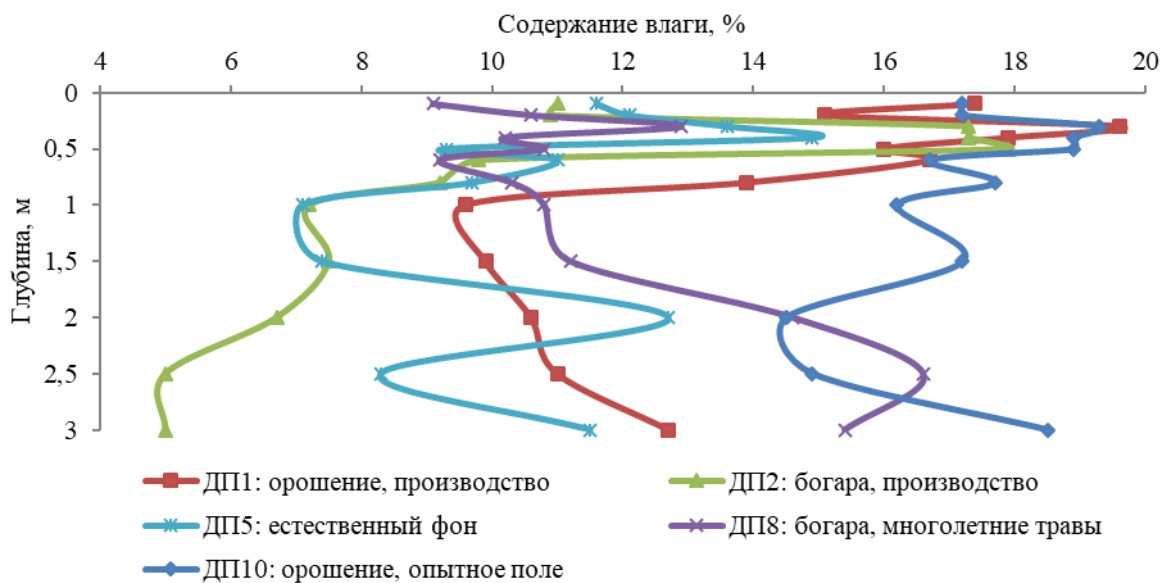
Расчеты показали, что орошаемая кукуруза при должном уходе и применении минеральных удобрений обеспечивает за год возврат до 1,465 т/га

только вовлекаемого в почвообразовательные процессы органического вещества. Это обеспечивает неотрицательный баланс, но из-за интенсивной минерализации гумуса уступает естественным (степным) биотопам (плюс 0,428 т/га). Еще более выгодный баланс обеспечивает травосмесь, по нашим оценкам, положительное сальдо по органическому веществу почвы здесь составляет 0,575 т/га.

Расчеты, результаты которых показаны в таблице 1, проведены с использованием усредненных коэффициентов гумификации и минерализации [13]. Исследования показали, что биологическая активность почвы – величина непостоянная, в т. ч. существенно зависит от содержания свободной почвенной влаги. Орошение является единственным способом поддержания оптимального водно-воздушного режима почвы в аридных регионах. Без орошения в сухостепной и полупустынной зонах Нижнего Поволжья уже к первой декаде июня доступной влаги практически не остается (рисунок 2).

Характерно, что содержание влаги на участке, где выращивали суданскую траву без орошения (богара), в пахотном слое оказалось существенно выше, чем на естественном фоне (контроль, ДП5) и чем в посевах многолетних трав (ДП8), где почва ряд лет не обрабатывалась. Это свидетельствует о важности разуплотнения зональных окарбоначенных почв для оптимизации водного режима почвы и эффективного использования водных ресурсов.

В полупустынной зоне степь (естественный фон) оказалась иссушена на всю глубину профиля (3 м). Характерны различия, полученные на участках с капельным орошением (овощные) и дождеванием полевых культур. Капельный полив является наиболее удобным и гибким инструментом для поддержания оптимальной влажности почвы даже в жестких условиях полупустынной зоны.



**Рисунок 2 – Профили влажности почвы
на динамических площадках с разными формами
хозяйственного использования (1-я декада июня, 2025 г.)**
**Figure 2 – Soil moisture profiles at dynamic sites
with different forms of economic use (first ten days of June, 2025)**

В исследовании проведена оценка целлюлозолитической активности почвы на участках с разными формами хозяйственного использования по разложению льняных полотен (таблица 2). Наибольшая степень разложения растительного полотна отмечена при орошении (ДП1), средний

процент убыли ткани составил 8,96 %. Разложение льняного полотна, расположенного на неорошаемом участке (ДП2), составило 1,13 %. Самый низкий процент разложения получен на естественном фоне (контроль, ДП5) – 0,46 %. Полученные данные в наибольшей степени согласуются с особенностями формирования водного режима почвы на этих участках.

Таблица 2 – Оценка целлюлозолитической активности почвы по разложению льняного полотна за тестовый период (30 сут, 2025 г.)

Table 2 – Assessment of soil cellulolytic activity for the flax cloth decomposition over the test period (30 days, 2025)

Динамическая площадка	Номер полотна	Масса до закладки, г	Масса после закладки, г	Убыль, %	Среднее значение убыли, %
ДП1: орошение	8	11,05	10,55	4,52	8,96
	9	10,45	9,05	13,40	
ДП2: богара	4	10,40	10,35	0,48	1,13
	5	10,75	10,60	1,40	
	6	9,90	9,75	1,52	
ДП5: контроль (естественный фон)	10	10,45	10,55	0,48	0,46
	11	10,80	10,95	0,46	
	12	11,35	11,65	0,44	
НСР ₀₅		–	–	–	0,96

Увеличение деструкции целлюлозы в агроценозе с применением орошения связано с созданием благоприятных условий для деятельности целлюлозоразлагающей группы микроорганизмов.

Кроме того, изучалась динамика вовлечения растительных остатков в почвообразовательные процессы. Исследования были заложены с соломённой резкой сои (таблица 3). Отмечено, что на участке, где поливы не проводились, за вегетационный период в почвообразовательные процессы вовлекалось не более 21,83 % растительных остатков. На участках с орошением разложение растительных остатков активизировалось, среднее значение убыли составило 36,75 %.

Наибольший процент разложения растительных остатков за вегетационный период отмечен в степном биоценозе – 43,6 %. Это на 6,9 % вы-

ше, чем на орошаемых производственных участках, что актуализирует задачу оптимизации микробиома почвы в производственных условиях.

**Таблица 3 – Динамика разложения растительных остатков
(соевая солома, 2025 г.)**

Table 3 – Dynamics of plant residue decomposition (soybean straw, 2025)

Динамическая площадка	Растительные остатки			Разложение, %
	Начальная масса, г	Конечная масса, г	Убыль, г	
ДП1: орошение	20	12,65	7,35	36,75
ДП2: богара	20	15,63	4,37	21,85
ДП5: контроль (естественный фон)	20	11,27	8,73	43,65
НСР ₀₅		0,77	0,63	3,2

Значимой зональной проблемой, оказывающей непосредственное влияние на процессы гумусообразования, миграцию питательных элементов, водные и физические свойства почвы, является повышенное содержание карбоната кальция. Это слаборастворимая в воде, нейтральная соль, которая не оказывает значимого токсичного влияния на растения, однако определяет водопроницаемость и твердость почвы. Глубина аккумулятивно-карбонатного горизонта на участках варьирует во взаимосвязи с рельефом от 0,33 м (ДП1) до 0,65 м (ДП10), что оказывает влияние на процессы окарбонативания пахотного горизонта. При малой глубине аккумулятивно-карбонатного горизонта на ДП1 повсеместно наблюдалось вскипание HCl с поверхности почвы: диффузия карбонатов определяется механическими обработками и миграцией в почвенном растворе. На участках ДП2 при глубине залегания аккумулятивно-карбонатного горизонта 0,5 м вскипание HCl с поверхности почвы не отмечено. На участках ДП8 карбонатного горизонта нет, однако слабое вскипание HCl с поверхности почвы отмечено из-за локального намыва карбонатного материала.

Окарбонативание пахотного горизонта актуализирует проблему переуплотнения почвы. Высокая плотность сложения почвы совокупно с повышенным содержанием карбонатов увеличивает риски формирования барьеров, развития поверхностного стока, ухудшает водный обмен и аэра-

цию, условия для развития корневой системы, снижает продуктивность посевов [15–17]. В исследованиях плотность сложения пахотных орошаемых и неорошаемых почв изменялась в среднем от 1,14 до 1,44 т/м³ в слое 0–0,30 м и от 1,38 до 1,60 т/м³ – в подпахотных горизонтах (таблица 4). На контроле (естественный фон) плотность сложения почвы изменялась от 1,33 до 1,44 т/м³. Наибольшее значение плотности отмечено в условиях орошения – 1,60 т/м³ в слое 0,30–0,60 м. Это критический уровень плотности сложения для зональных типов почвы, который угнетает рост и реализацию продукционного потенциала орошаемых культур [16].

**Таблица 4 – Плотность сложения почвы на тестовых участках
(1–2-я декада июня 2025 г.)**

Table 4 – Soil density in test plots (1st–2nd ten-day period of June 2025)

Слой, м	ДП1: орошение, производство	ДП2: временно не орошается	ДП5 (контроль): условно нативный участок	ДП-8: многолетние травы	ДП-10: опытное поле
0–0,1	1,18	1,22	1,34	1,22	1,22
0,1–0,2	1,14	1,20	1,38	1,24	1,24
0,2–0,3	1,43	1,39	1,39	1,34	1,44
0,3–0,4	1,46	1,32	1,38	1,23	1,60
0,4–0,5	1,51	1,32	1,32	1,31	1,60
0,5–0,6	1,50	1,37	1,36	1,44	1,57

Значимыми зональными рисками ухудшения эколого-мелиоративного состояния орошаемых земель являются засоление и осолонцевание почвы. В индустриальный период развития мелиорации эти риски определялись прежде всего растущими водными нагрузками, не всегда согласованными с гидрогеологическими особенностями орошаемых агроландшафтов. В постиндустриальный период развития мелиораций значимость этого фактора существенно снизилась. Анализ образцов почвы с тестовых участков показал отсутствие засоления плодородного слоя почвы (рисунок 3). Данные, полученные в результате многолетнего мониторинга, подтверждают выводы [18] о миграции водорастворимых солей в более глубокие горизонты в результате формирования преимущественно нисходящего тока воды на орошаемых участках. На фоне глубокого залегания грунтовых

вод при достаточной дренированности территории этот механизм преобладает, а орошение способствует рассолению плодородного слоя. Необходимо учитывать, что отмеченный тренд рассоления сформирован в постиндустриальный период развития мелиорации и происходит на фоне сравнительно невысоких водных нагрузок на агроландшафты.

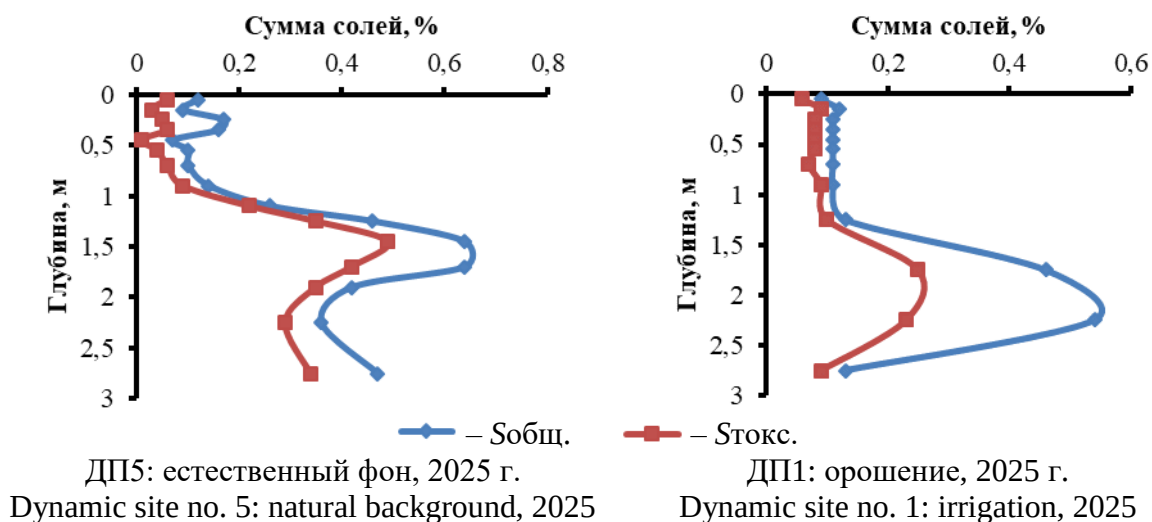


Рисунок 3 – Динамика содержания водорастворимых солей в почвенном профиле тестовых участков

Figure 3 – Dynamics of water-soluble salt content in soil profile of test plots

Исследованиями отмечены признаки солонцеватости в виде темных гумусово-глинистых пленок (кутан) на боковых гранях призмовидных структур (рисунок 4).

Процесс характеризуется накоплением поглощенного натрия в профиле и, что особенно важно, почвенном покрове длительно орошаемых земель. Отмеченные признаки характеризуют участие оросительной воды в формировании солонцеватых комплексов [18]. Забор воды для орошения мелиорированных земель в пределах зоны размещения тестовых участков системы мониторинга осуществляется из водных объектов Волго-Донского судоходного канала. Минерализация воды составляет 1,01–1,12 г/л, что существенно выше, чем в источниках, питающихся из объектов Волжского бассейна, однако по уровню SAR (3,1) вода пригодна для орошения без ограничений [19].

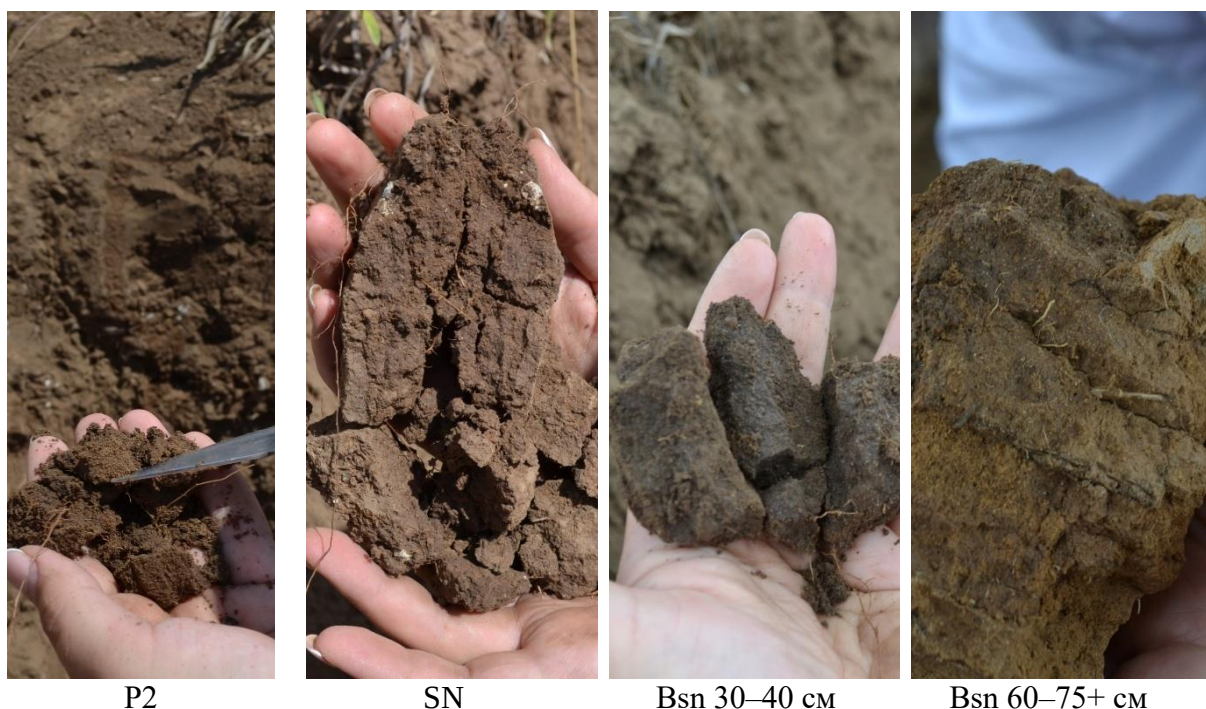


Рисунок 4 – Диагностические признаки горизонтов почвенного профиля: ДП8 – многолетние травы, 2025 г. (фото Н. Г. Кругляковой)

Figure 4 – Diagnostic features of soil profile horizons: dynamic site no. 8 – perennial grasses, 2025 (photo by N. G. Kruglyakova)

Наряду с этим отмеченные признаки солонцеватости подтверждают, что процесс может длительно развиваться даже при орошении слабоминерализованной водой. В этой связи для наиболее полного учета факторов ионообменной сорбции натрия в почве считаем целесообразным апробировать методику А. Н. Николаенко [20], учитывающую не только химический состав воды, но и физико-химические свойства почвы.

Выводы. В постиндустриальный период развития мелиораций эколого-мелиоративное состояние орошаемых земель стабилизировалось. Многолетние наблюдения в системе мониторинга длительно орошаемых земель на примере ОС «Орошаемое» показали следующее.

1 Изменения в содержании органического вещества почвы не имеют значимого тренда. Однако в сравнении с естественным фоном содержание органического вещества снижено на 0,20–0,89 % на орошаемых землях и на 0,49–1,48 % на богаре. Это может быть связано с усилением процессов

минерализации почвенной органики при распашке, которая не в полной мере возмещается поступлением органического вещества в почву. Отсутствие тренда обусловлено занятием новой экологической ниши для орошаемых (выше) и неорошаемых (ниже) земель соответственно.

2 Динамика органического вещества почвы определяется балансом минерализации гумуса и поступления органических форм (растительных, животных) в почву. В опытах орошение (кукуруза на силос) обеспечивало неотрицательный баланс гумуса (плюс 0,297 т/га), который, однако, оказался ниже, чем на естественном фоне (плюс 0,428 т/га).

3 Динамика вовлечения органического вещества в почвообразовательные процессы может существенно изменяться и зависит от условий водообеспечения. Орошение является единственным способом поддержания оптимального водно-воздушного режима почвы в аридных регионах. Динамика разложения соевой соломы при орошении в сравнении с богарой возрастала в 1,4–2,2 раза.

4 Значимой зональной проблемой, оказывающей непосредственное влияние на процессы гумусообразования, миграцию питательных элементов, водные и физические свойства почвы, является повышенное содержание карбоната кальция. Окарбоначивание пахотного горизонта актуализирует проблему переуплотнения почвы: от 1,14–1,40 т/м³ в слое 0–0,30 м до 1,40–1,60 т/м³ в подпахотных горизонтах.

5 Исследованиями подтвержден тренд рассоления почвы и перераспределения водорастворимых солей в более глубокие горизонты при орошении. Необходимо учитывать, что отмеченный тренд рассоления сформирован в постиндустриальный период развития мелиорации и происходит на фоне сравнительно невысоких водных нагрузок на агроландшафты.

6 Получены данные, подтверждающие развитие процессов осолонцевания почвы при орошении водой с минерализацией 1,01–1,12 г/л и SAR = 3,1. Данные в том числе свидетельствуют о недостаточности кон-

цепции SAR для наиболее полного учета факторов ионообменной сорбции натрия и опасности осолонцевания почвы при оценке качества оросительной воды.

Список источников

1. Кружилин И. П. Комплексная мелиорация земель обеспечит устойчивое развитие сельского хозяйства Поволжья // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2011. № 1. С. 14–16. EDN: NDGQXD.
2. Шевченко В. А., Кирейчева Л. В. Комплексная мелиорация – основа технологического обеспечения продовольственной безопасности и сохранения плодородия почв // Природообустройство. 2025. № 1. С. 6–12. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-1-6-12. EDN: WULZRS.
3. Новиков А. Е., Дранников А. В. Прецизионные технологии орошения в повышении устойчивости земледелия к природным изменениям // Орошаемое земледелие. 2024. № 4(47). С. 45–50. DOI: 10.35809/2618-8279-2024-4-7. EDN: AYRNAJ.
4. Шокиров Р. С., Файзибоев М. М. Особенности принятия управленческих решений в сельском хозяйстве в условиях изменения климата // Вестник Таджикского государственного университета права, бизнеса и политики. Серия общественных наук. 2025. № 3(104). С. 136–150. DOI: 10.24412/3005-8023-2025-3-136-150. EDN: NWLOGI.
5. Кленова Т. В. Роль орошаемого земледелия в решении задач продовольственного обеспечения населения страны // Вестник Волгоградского государственного университета. Экономика. 2025. Т. 27, № 3. С. 97–111. DOI: 10.15688/ek.jvolsu.2025.3.8. EDN: ZZOGYK.
6. Стратегический подход к развитию мелиорации в условиях меняющегося климата / В. Н. Щедрин, Р. С. Масный, С. А. Манжина, С. В. Куприянова // Мелиорация и водное хозяйство. 2022. № 2. С. 11–17. DOI: 10.32962/0235-2524-2022-2-11-18. EDN: KVGWSI.
7. Иванов А. Л. Инновационные приоритеты в развитии систем мелиорации в России // Плодородие. 2011. № 5(62). С. 2–4. EDN: OHKVTD.
8. Бородычев В. В., Конторович И. И. Нужен ли дренаж орошаемых земель в Волгоградской области? // Мелиорация и водное хозяйство. 2022. № 4. С. 36–41. DOI: 10.32962/0235-2524-2022-4-36-41. EDN: WBXDCU.
9. Семененко С. Я., Новиков А. Е. Показатели мелиоративного состояния орошаемых земель Волгоградской области // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 1(69). С. 114–123. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-01-11. EDN: MPWUNX.
10. Шевченко В. А., Бородычев В. В., Лытов М. Н. Варианты реконструкции гидромелиоративных систем на бывших мелиорированных длительно не используемых сельскохозяйственных землях // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 4(60). С. 313–327. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-31. EDN: TDRPZU.
11. Дедова Э. Б., Бородычев В. В., Шуравилин А. В. Хозяйственно-мелиоративная оценка оросительных систем Республики Калмыкии // Мелиорация и водное хозяйство. 2011. № 4. С. 11–13. EDN: NYLTZH.
12. Экологическое состояние орошаемых агроландшафтов локального мониторинга на Волго-Донском междуречье / В. В. Мелихов, А. А. Зибаров, Н. П. Мелихова, Д. С. Тегесов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и

высшее профессиональное образование. 2018. № 4(52). С. 29–36. DOI: 10.32786/2071-9485-2018-04-3. EDN: YXTVUD.

13. Новоселов С. И. О методических подходах к расчету баланса гумуса в севообороте // Агрохимия. 2020. № 10. С. 28–35. DOI: 10.31857/S0002188120100075. EDN: RUBGEZ.

14. Карбонатный профиль почв каштановых солонцовых комплексов и его антропогенная трансформация в пашне / Н. Б. Хитров, Н. Г. Круглякова, И. Н. Горохова, Е. И. Кравченко // Почвоведение. 2025. № 8. С. 1025–1054. DOI: 10.31857/S0032180X25080046. EDN: INOENA.

15. Zhang H., He T. Topsoil compaction risk based on the different responses of soil structure to compaction stress // Agronomy. 2025. Vol. 15, № 1. P. 78. DOI: 10.3390/agronomy15010078. EDN: FFICUJ.

16. Шадских В. А., Кижаяева В. Е. Прогноз изменения агрофизических характеристик почв Поволжья под влиянием длительного орошения // Орошаемое земледелие. 2022. № 3(38). С. 56–61. DOI: 10.35809/2618-8279-2022-3-12. EDN: NTXKQK.

17. Optimizing root phenotypes for compacted soils: enhancing root-soil-microbe interactions / J. Xu, Z. Long, B. Sun, F. Zhang, J. Shen, K. Jin // Plant, Cell & Environment. 2025. Vol. 48, № 6. P. 4656–4667. DOI: 10.1111/pce.15462. EDN: RKNCLC.

18. Современное состояние орошаемых почв юга Приволжской возвышенности / Е. В. Зинченко, И. Н. Горохова, Н. Г. Круглякова, Н. Б. Хитров // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2020. № 104. С. 68–109. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-68-109. EDN: LSREIQ.

19. Мелиоративная оценка пригодности поверхностных вод водозаборной зоны Береславского водохранилища для орошения / А. Е. Новиков, А. Ю. Торопов, А. А. Поддубский, М. В. Московец, Р. В. Збукарев // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2024. Т. 19, № 4. С. 631–640. DOI: 10.22363/2312-797X-2024-19-4-631-640. EDN: BCIIAN.

20. Николаенко А. Н. Расчет воздействия химического состава оросительной воды на структурные свойства почв // Мелиорация и водное хозяйство. 2025. № 5. С. 32–35. DOI: 10.32962/0235-2524-2025-5-32-35. EDN: HUZSBS.

References

1. Kruzhilin I.P., 2011. *Kompleksnaya melioratsiya zemel' obespechit ustoychivoye razvitiye sel'skogo khozyaystva Povolzh'ya* [Complex land reclamation will ensure sustainable development of agriculture in the Volga region]. *Vestnik Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences], no. 1, pp. 14-16, EDN: NDGQXD. (In Russian).

2. Shevchenko V.A., Kireycheva L.V., 2025. *Kompleksnaya melioratsiya – osnova tekhnologicheskogo obespecheniya prodovol'stvennoy bezopasnosti i sokhraneniya plodorodiya pochv* [Integrated land reclamation as the basis for technological food security and soil fertility preservation]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 1, pp. 6-12, DOI: 10.26897/1997-6011-2025-1-6-12, EDN: WULZRS. (In Russian).

3. Novikov A.E., Drannikov A.V., 2024. *Pretsizionnye tekhnologii orosheniya v povyshenii ustoychivosti zemledeliya k prirodnym izmeneniyam* [Precision irrigation technologies in increasing the resilience of agriculture to natural changes]. *Oroshaemoe zemledelie* [Irrigated Agriculture], no. 4(47), pp. 45-50, DOI: 10.35809/2618-8279-2024-4-7, EDN: AYRNAJ. (In Russian).

4. Shokirov R.S., Fayziboev M.M., 2025. *Osobennosti prinyatiya upravlencheskikh resheniy v sel'skom khozyaystve v usloviyakh izmeneniya klimata* [Features of making management decisions in agriculture in the context of climate change]. *Vestnik Tadzhikskogo gosudar-*

stvennogo universiteta prava, biznesa i politiki. Seriya obshchestvennykh nauk [Bulletin of Tajik State University of Law, Business and Politics. Series of Social Sciences], no. 3(104), pp. 136-150, DOI: 10.24412/3005-8023-2025-3-136-150, EDN: NWLOGI. (In Russian).

5. Klenova T.V., 2025. *Rol' oroshaemogo zemledeliya v reshenii zadach prodo-vol'stvennogo obespecheniya naseleniya strany* [The role of irrigated agriculture in solving the problems of food security of the country's population]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika* [Bulletin of Volgograd State University. Economics], vol. 27, no. 3, pp. 97-111, DOI: 10.15688/ek.jvolsu.2025.3.8, EDN: ZZOGYK. (In Russian).

6. Shchedrin V.N., Masnyi R.S., Manzhina S.A., Kupriyanova S.V., 2022. *Strategicheskiy podkhod k razvitiyu melioratsii v usloviyakh menyayushchegosya klimata* [Strategic approach to development of land reclamation in a changing climate]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 2, pp. 11-17, DOI: 10.32962/0235-2524-2022-2-11-18, EDN: KVGWSI. (In Russian).

7. Ivanov A.L., 2011. *Innovatsionnye priority v razvitii sistem melioratsii v Rossii* [Innovation priorities in the development of land reclamation systems in Russia]. *Plodorodie* [Fertility], no. 5(62), pp. 2-4, EDN: OHKVTD. (In Russian).

8. Borodychev V.V., Kontorovich I.I., 2022. *Nuzhen li drenazh oroshaemykh zemel' v Volgogradskoy oblasti?* [Is drainage of irrigated lands in the Volgograd region necessary?]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 4, pp. 36-41, DOI: 10.32962/0235-2524-2022-4-36-41, EDN: WBXDCU. (In Russian).

9. Semenenko S.Ya., Novikov A.E., 2023. *Pokazateli meliorativnogo sostoyaniya oroshaemykh zemel' Volgogradskoy oblasti* [Indicators of the melioration state of irrigated lands in the Volgograd region]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education], no. 1(69), pp. 114-123, DOI: 10.32786/2071-9485-2023-01-11, EDN: MPWUNX. (In Russian).

10. Shevchenko V.A., Borodychev V.V., Lytov M.N., 2020. *Varianty rekonstruktsii gidromeliorativnykh sistem na byvshikh meliorirovannykh dlitel'no ne ispol'zuemykh sel'skokhozyaystvennykh zemlyakh* [Options for reconstruction of irrigation and drainage systems on former reclaimed long-unused agricultural lands]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education], no. 4(60), pp. 313-327, DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-31, EDN: TDRPZU. (In Russian).

11. Dedova E.B., Borodychev V.V., Shuravilin A.V., 2011. *Khozyaystvenno-meliorativnaya otsenka orositel'nykh sistem Respubliki Kalmykii* [Economic and land-reclamation estimate of irrigation systems at the Kalmykia Republic]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 4, pp. 11-13, EDN: NYLTZH. (In Russian).

12. Melikhov V.V., Zibarov A.A., Melikhova N.P., Tegesov D.S., 2018. *Ekologicheskoe sostoyanie oroshaemykh agrolandshaftov lokal'nogo monitoringa na Volgo-Donskom mezhdurech'e* [Environmental condition of irrigated agrolandscapes of local monitoring in the Volga-Don interfluve]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education], no. 4(52), pp. 29-36, DOI: 10.32786/2071-9485-2018-04-3, EDN: YXTVUD. (In Russian).

13. Novoselov S.I., 2020. *O metodicheskikh podkhodakh k raschetu balansa gumusa v sevooborote* [On methodological approaches to calculating the humus balance in crop rotation]. *Agrokimiya* [Agrochemistry], no. 10, pp. 28-35, DOI: 10.31857/S0002188120100075, EDN: RUBGEZ. (In Russian).

14. Khitrov N.B., Kruglyakova N.G., Gorokhova I.N., Kravchenko E.I., 2025. *Karbonatnyy profil' pochv kashtanovykh solontsovykh kompleksov i yego antropogennaya trans-*

formatsiya v pashne [Carbonate profile of soils of chestnut solonetz complexes and its anthropogenic transformation in arable land]. *Pochvovedenie* [Soil Science], no. 8, pp. 1025-1054, DOI: 10.31857/S0032180X25080046, EDN: INOENA. (In Russian).

15. Zhang H., He T., 2025. Topsoil compaction risk based on the different responses of soil structure to compaction stress. *Agronomy*, vol. 15, no. 1, p. 78, DOI: 10.3390/agronomy15010078, EDN: FFICUJ.

16. Shadskikh V.A., Kizhaeva V.E., 2022. *Prognoz izmeneniya agrofizicheskikh kharakteristik pochv Povolzh'ya pod vliyaniem dlitel'nogo orosheniya* [Forecast of changes in agrophysical characteristics of soils of the Volga region under the influence of long-term irrigation]. *Oroshaemoe zemledelie* [Irrigated Agriculture], no. 3(38), pp. 56-61, DOI: 10.35809/2618-8279-2022-3-12, EDN: NTKKQK. (In Russian).

17. Xu J., Long Z., Sun B., Zhang F., Shen J., Jin K., 2025. Optimizing root phenotypes for compacted soils: enhancing root-soil-microbe interactions. *Plant, Cell & Environment*, vol. 48, no. 6, pp. 4656-4667, DOI: 10.1111/pce.15462, EDN: RKNCLC.

18. Zinchenko E.V., Gorokhova I.N., Kruglyakova N.G., Khitrov N.B., 2020. *Sovremennoe sostoyanie oroshaemykh pochv yuga Privolzhskoy vozvysheynosti* [Modern state of irrigated soils at the south of the Volga Upland]. *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva* [Bulletin of Dokuchaev Soil Science Institute], no. 104, pp. 68-109, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-104-68-109, EDN: LSREIQ. (In Russian).

19. Novikov A.E., Toropov A.Yu., Poddubsky A.A., Moskovets M.V., Zbukarev R.V., 2024. *Meliorativnaya otsenka prigodnosti poverkhnostnykh vod vodozabornoj zony Bereslavskogo vodokhranilishcha dlya orosheniya* [Suitability and assessment of surface water in the Bereslav reservoir water-intake zone for irrigation purpose]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta družby narodov. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo* [RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries], vol. 19, no. 4, pp. 631-640, DOI: 10.22363/2312-797X-2024-19-4-631-640, EDN: BCIIAN. (In Russian).

20. Nikolaenko A.N., 2025. *Raschet vozdeystviya khimicheskogo sostava orositel'noy vody na strukturnye svoystva pochv* [Calculation of the effects of the chemical composition of irrigation water on the structural properties of soils]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 5, pp. 32-35, DOI: 10.32962/0235-2524-2025-5-32-35, EDN: HUZSBS. (In Russian).

Информация об авторах

М. Н. Лытов – ведущий научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал Федерального научного центра гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова (400002, Волгоградская область, г. Волгоград, ул. им. Тимирязева, д. 9), LytovMN@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-2743-9825;

Н. Г. Круглякова – младший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал Федерального научного центра гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова (400002, Волгоградская область, г. Волгоград, ул. им. Тимирязева, д. 9), Kruglyakova02032013@yandex.ru, ORCID: 0009-0009-6566-7360;

Г. А. Рулев – старший научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук, Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал Федерального научного центра гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова (400002, Волгоградская область, г. Волгоград, ул. им. Тимирязева, д. 9), G.heroes@yandex.ru, vkovniigim@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-3815-0448;

Е. В. Зинченко – научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук, Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал Феде-

рального научного центра гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова (400002, Волгоградская область, г. Волгоград, ул. им. Тимирязева, д. 9), Kat-str@inbox.ru, ORCID: 0000-0002-9953-2319;

С. В. Мельник – младший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия – филиал Федерального научного центра гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова (400002, Волгоградская область, г. Волгоград, ул. им. Тимирязева, д. 9), Melnik_s1996@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5802-1339.

Information about the authors

M. N. Lytov – Leading Researcher, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture – branch of the Federal Scientific Center of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov (400002, Volgograd region, Volgograd, Timiryazeva st., 9), LytovMN@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-2743-9825;

N. G. Kruglyakova – Junior Researcher, All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture – branch of the Federal Scientific Center of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov (400002, Volgograd region, Volgograd, Timiryazeva st., 9), Kruglyakova02032013@yandex.ru, ORCID: 0009-0009-6566-7360;

G. A. Rulev – Senior Researcher, Candidate of Agricultural Sciences, All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture – branch of the Federal Scientific Center of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov (400002, Volgograd region, Volgograd, Timiryazeva st., 9), G.heroes@yandex.ru, vkovniigim@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-3815-0448;

E. V. Zinchenko – Researcher, Candidate of Agricultural Sciences, All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture – branch of the Federal Scientific Center of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov (400002, Volgograd region, Volgograd, Timiryazeva st., 9), Kat-str@inbox.ru, ORCID: 0000-0002-9953-2319;

S. V. Melnik – Junior Researcher, All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture – branch of the Federal Scientific Center of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov (400002, Volgograd region, Volgograd, Timiryazeva st., 9), Melnik_s1996@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5802-1339.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.04.2026; одобрена после рецензирования 23.06.2026; принята к публикации 09.09.2026.

The article was submitted 13.04.2026; approved after reviewing 23.06.2026; accepted for publication 09.09.2026.