

РОЛЬ МЕЛИОРАЦИИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА В ОБЕСПЕЧЕНИИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Научная статья

УДК 631.445.52:631.67

Оценка физико-химических свойств засоленных почв Сырдарьинской области Республики Узбекистан и экспериментальное обоснование эффективных методов их мелиорации

Юлия Илларионовна Широкова¹, Гаухарай Калбаевна Палуашова²,
Дилшод Тохирович Кодиров³, Фархад Фатуллоевич Садиев⁴

^{1, 2, 3, 4}Научно-исследовательский институт ирригации и водных проблем, Ташкент, Республика Узбекистан

¹yulia.i.shirokova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5455-877X>

²gavhar2005@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7380-8367>

³qdt1004@umail.uz, <https://orcid.org/0009-0004-5819-4861>

⁴fsf7711@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-8916-5088>

Аннотация. Цель: оценка физико-химических свойств сероземно-луговых почв и обоснование методов повышения выщелачивания солей на основе экспериментальных исследований. **Материалы и методы.** Экспериментальные данные почвенных полевых и лабораторных исследований: водно-физические и химические свойства почв (гранулометрический состав, объемная масса, водопроницаемость, наличие гипса и карбонатов, химический состав почвы (растворимых ионов), состав катионов в почвенном поглощающем комплексе (ППК). Статистическая обработка, оценка применимости технологий мелиорации засоленных почв, протестированных в полевых условиях. **Результаты.** Установлено, что причинами низкой водопроницаемости и, соответственно, солеотдачи исследованных легко- и среднесуглинистых почв являются: высокая плотность верхних горизонтов, повышенное содержание карбонатов по всему профилю, прослой гипса. Выявлено, что содержание поглощенного магния в ППК в 2–4 раза превышает содержание обменного кальция, оказывая диспергирующее воздействие на почвы. Установлена линейная зависимость между водорастворимым и поглощенным магнием, однако низкая водопроницаемость и солеотдача почв являются препятствием для промывки и снижения магния и в почве, и в ППК. Исследованиями авторов обоснована возможность усиления выщелачивания солей и сокращения затрат воды при технологиях рассоления почвы, альтернативных промывке слоев воды: а) промывной режим орошения; б) использование атмосферных осадков; в) промывка по бороздам с применением мелиоранта Биосолвент (рН~2), созданного на основе органической кислоты. **Выводы.** На основе комплексного исследования и анализа причин низкой водопроницаемости и солеотдачи почв Мирзаабадского района Сырдарьинской области, экспериментального обоснования эффективности технологий рассоления почвы с применением глубокого рыхления и органических кислот рекомендованы способы мелиорации почв со сложными водно-физическими и химическими свойствами, альтернативные промывкам слоев воды.

Ключевые слова: засоленные почвы, физико-химические свойства, выщелачивание солей, совершенствование технологий мелиорации, рыхление почв, химические мелиоранты

Апробация результатов исследования: основные положения статьи доложены на Международной научно-практической конференции «Роль мелиорации и водного хозяйства в обеспечении устойчивого развития земледелия» (г. Новочеркасск, 18 февраля 2026 г.).

Для цитирования: Оценка физико-химических свойств засоленных почв Сырдарьинской области Республики Узбекистан и экспериментальное обоснование эффективных методов их мелиорации / Ю. И. Широкова, Г. К. Палуашова, Д. Т. Кодиров, Ф. Ф. Садиев // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2026. Т. 98, № 1. С. 19–42.

THE ROLE OF LAND RECLAMATION AND WATER MANAGEMENT IN ENSURING THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF AGRICULTURE

Original article

Assessment of the physical and chemical properties of saline soils in the Syrdarya region of the Republic of Uzbekistan and experimental substantiation of effective methods of their reclamation

Yulia I. Shirokova¹, Gauharay K. Paluashova², Dilshod T. Kodirov³,
Farkhod F. Sadiev⁴

^{1, 2, 3, 4}Scientific Research Institute of Irrigation and Water Problems, Tashkent,
Republic of Uzbekistan

¹yulia.i.shirokova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5455-877X>

²gavhar2005@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7380-8367>

³qdt1004@umail.uz, <https://orcid.org/0009-0004-5819-4861>

⁴fsf7711@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-8916-5088>

Abstract. Purpose: to assess the physicochemical properties of meadow sierozemic soil and to substantiate methods for increasing salt leaching based on experimental studies. **Materials and methods.** Experimental data from soil field and laboratory studies: hydrophysical and chemical properties of soils (particle size distribution, bulk density, water permeability, gypsum and carbonates presence, chemical soil content (soluble ions), composition of cations in the soil absorption complex (SAC). Statistical processing and assessment of the applicability of technologies of saline soils reclamation tested in the field. **Results.** It was determined that the reasons for low water permeability and, accordingly, salt release of the studied light and medium loamy soils are: high density of the upper horizons, increased content of carbonates throughout the profile, gypsum interlayers. It was revealed that the content of absorbed magnesium in the SAC is 2–4 times higher than the content of exchangeable calcium, exerting a dispersing effect on soils. A linear relationship between water-soluble and absorbed magnesium was found, however, low water permeability and salt release of soils are an obstacle to leaching and magnesium reduction both in soil and in SAC. The authors' research substantiates the possibility of enhancing salt leaching and reducing water consumption using soil desalination technologies alternative to leaching with a water layer: a) leaching irrigation mode; b) using atmospheric precipitation; c) furrow leaching using the Biosolvent ameliorant (pH ~2), created with an organic acid. **Conclusions.** Based on a comprehensive study and analysis of the causes of low water permeability and salt release in the Mirzaabad district of the Syrdarya region, and experimental substantiation of the effectiveness of soil desalination technologies applying subsoiling and organic acids, alternative soil reclamation methods for soils with complex hydrophysical and chemical properties are recommended.

Keywords: saline soils, physical and chemical properties, salt leaching, improvement of soil reclamation technologies, soil loosening, chemical ameliorants

Evaluation of the research results: the main provisions of the article were reported at the International scientific and practical conference “The role of land reclamation and water management in ensuring the sustainable development of agriculture” (Novocherkassk, February 18, 2026).

For citation: Shirokova Yu. I., Paluashova G. K., Kodirov D. T., Sadiev F. F. Assessment of the physical and chemical properties of saline soils in the Syrdarya region of the Republic of Uzbekistan and experimental substantiation of effective methods of their reclamation. *Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture*. 2026;98(1):19–42. (In Russ.).

Введение. На территории Сырдарьинской области Узбекистана с орошаемой площадью 287,1 тыс. га засоление почв распространено на 97 %, из которых 24,7 % имеют среднюю и сильную степень засоления. Это снижает урожайность сельскохозяйственных культур и эффективность земле- и водопользования. По данным института почвоведения и агрохимии Республики Узбекистан, 177,046 тыс. га орошаемых земель области, или 61,7 % представлены слабоводопроницаемыми почвами. По Мирзаабадскому району Сырдарьинской области вышеуказанные данные представлены следующими цифрами: из 29,9 тыс. га орошаемых земель засолено 91 %, из которых 29 % средне- и сильнозасолены; 21,0 тыс. га, или 51,2 % имеют низкую водопроницаемость почвы.

Уплотнение почв за счет присутствия гипсовых слоев в сочетании с сильным засолением встречается в Сардобинском районе, части Мирзаабадского и Хавастского районов. Общая площадь составляет более 86 тыс. га.

Указанные районы с неблагоприятными свойствами почв, прежде всего по рельефу, относятся к пониженным частям территории Голодной степи. Это Сардобинское и Мирзачульское понижения (современное расположение Сардобинского и Мирзаабадского районов Сырдарьинской области). На территории Сардобинского района на глубине 70 см и ниже залегают гипсы, которые имеют низкую водопроницаемость и накапливают соли, а также не позволяют проводить качественную промывку земель.

Вышеизложенное указывает на проблему эффективности рассоления почв по известной технологии промывки слоев воды по чекам. Кроме того,

экспериментально доказано, что эта технология промывки водозатратна и приводит к уплотнению почвы. В данной статье поставлена цель: провести комплексную оценку причин низкой фильтрации и солеотдачи почв данного региона на основе исследования физико-химических свойств и предложить соответствующие инновационные методы мелиорации.

Материалы и методы. На опытном участке (ОПУ) в Мирзаабадском районе Сырдарьинской области методами полевых и лабораторных исследований были изучены свойства почв. Водно-физические свойства почв определяли следующим образом: объемная масса (плотность сложения почвы) – методом режущего кольца, водопроницаемость – методом наливных колец Нестерова. Лабораторные анализы почвы выполнены по общепринятым методикам в соответствии с ГОСТ и методикой выполнения химических анализов почвы (по Е. В. Аринушкиной). Мехсостав (гранулометрический состав) почвы определяли методом Стокса, гипс, карбонаты – методом солянокислой вытяжки, химический состав почвы – методом водной вытяжки (ВВ), состав катионов в ППК по Гедройцу. Электропроводность (EC_e) и pH измерены откалиброванными приборами: кондуктометром и pH-метром. Графическая и статистическая обработка данных лабораторных и полевых исследований для выявления взаимосвязей и закономерностей почвенных свойств и проверки гипотез выполнена в программе Excel. Для интерпретации результатов полевых исследований и данных лабораторных анализов, выявления взаимосвязей и закономерностей привлечены фондовые материалы лаборатории и опубликованные источники, содержащие теоретические и экспериментальные научные данные.

Основные свойства почв опытного участка, определенные в полевых и лабораторных исследованиях, приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Характеристика физических и химических свойств почв опытного участка в Мирзаабадском районе и сопоставление их с почвами Сардобинского района Сырдарьинской области

Table 1 – Characteristics of physical and chemical soil properties in the experimental plot in the Mirzaabad district and their comparison with soils in the Sardoba district of the Syrdarya region

Коэффициент фильтрации, м/сут	Плотность средняя в метровом слое, г/см ³	Содержание фракции крупной пыли (0,05–0,01), %	Содержание гипса, % к массе	Содержание карбонатов CaCO ₃ , % к массе	ECe ¹ , dS/m	Содержание в почве плотного остатка / хлор-иона, % к массе	Сумма токсичных солей, %	Содержание магния в почве (по водной вытяжке), % к массе	Содержание в ППК, мг-экв на 100 г почвы / % от ППК	
									магния	кальция
Мирзаабадский район										
0,01–0,017	0–40 см (1,56–1,78), ниже 40 см (1,42–1,53)	41,50–45,83	70–120 см (0,59–8,77)	16,8–20,2	6,04–13,76	1,147/0,083	0,204–0,437	0,026–0,036	4,0–5,5/ 50–73	1,4–3,6/ 18–54
Сардобинский район										
0,02–0,03	1,39	28,52	6,51–16,05	5,27–9,81	Не опр.	2,238/0,326	$\frac{1,278}{0,233}$ ²	0,045	$\frac{4,30}{1,00}$ / $\frac{50}{18}$ ²	$\frac{0,80}{4,86}$ / $\frac{8,5}{76}$ ²
Примечание – « ¹ » – Классификация показана в таблице 3; « ² » – Опыты на монолитах: в числителе – исходное состояние; в знаменателе – после промывки нормой 20 тыс. м ³ /га.										

Таблица 2 – Химический состав почвы на опытном участке в Мирзаабадском районе

Table 2 – Chemical soil composition in the experimental plot in the Mirzaabad district

Код поч- венного разреза	Гори- зонт, см	Плот- ный оста- ток, %	Содержание растворимых ионов, %											
			HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Гипс $\text{CaSO}_4 \cdot$ $2\text{H}_2\text{O}$, %	Карбонат кальция CaCO_3 , %	pH	<i>ECe</i> , dS/m	Na^+ , мг- экв/100 г почвы
P-1	0–22	0,514	0,024	0,039	0,272	0,076	0,016	0,043	0,004	0,59	20,2	8,5	6,0	1,871
	22–51	0,648	0,020	0,063	0,336	0,072	0,026	0,075	0,003	0,72	19,7	8,5	7,1	3,263
	51–71	0,620	0,024	0,081	0,300	0,072	0,022	0,078	0,002	1,35	19,3	8,5	7,2	3,393
	71–100*	1,336	0,017	0,081	0,768	0,222	0,041	0,090	0,002	8,68	18,0	8,3	12,3	3,915
	100–125	1,060	0,015	0,039	0,576	0,176	0,025	0,052	0,002	4,02	17,6	8,3	9,0	2,262
	> 125	1,064	0,015	0,119	0,576	0,154	0,038	0,110	0,002	6,47	16,8	8,3	10,8	4,785
P-2	0–40	0,928	0,021	0,053	0,520	0,132	0,030	0,075	0,006	0,98	19,0	8,5	9,0	3,263
	40–80	1,046	0,016	0,056	0,600	0,146	0,029	0,100	0,003	4,01	19,2	8,6	10,3	4,350
	80–120*	1,466	0,017	0,140	0,800	0,192	0,048	0,170	0,002	8,77	19,5	8,4	13,8	7,395
	140–170	0,816	0,015	0,042	0,490	0,132	0,029	0,060	0,002	3,14	19,7	8,5	8,3	2,610

Примечание – * – Горизонты с максимальным содержанием гипса и водорастворимых солей.

По гранулометрическому составу почвы средне- и легкосуглинистые. На глубине 80–100 см и ниже находится прослойка гипса до 8,7 %, содержание карбонатов равномерно по всему профилю 16,8–20,2 %. Отличительная особенность почвы – аномально высокое содержание поглощенного магния (Mg) по всему профилю. Поглощенный магний составляет 50–73 % от суммы оснований (4,0–5,5 мг-экв на 100 г почвы), при содержании поглощенного кальция (Ca) 18–54 % от суммы оснований (1,4–3,6 мг-экв на 100 г). При этом сумма поглощенных оснований составляет 6,85–8,50 мг-экв на 100 г. почвы.

Исследованные почвы обладают очень низкой водопроницаемостью: 0,01–0,017 м/сут. Засоление почвы неоднородное по профилю. По основным показателям оценки (таблица 3) засоление изменяется от средней до сильной степени (по EC_e в интервале от 6,04 до 13,76 dS/m; по плотному остатку – от 0,51 до 1,47 %; по хлор-иону – от 0,04 до 0,14 % от массы почвы).

Таблица 3 – Классификации оценки засоления почвы
Table 3 – Classifications of soil salinity assessment

Степень засоления почв	EC_e , dS/m ¹	по Cl ⁻ , % ²	по Na ⁺ , мг-экв/100 г почвы
Не засоленные	0–2	< 0,02	< 1
Слабозасоленные	2–4	0,02–0,035	1,0–3,0
Среднезасоленные	4–8	0,035–0,07	3,1–6,0
Сильнозасоленные	8–16	0,07–0,14	6,1–12,0
Очень сильнозасоленные	> 16	> 0,14	12,1–28,0

Связь между содержанием плотного остатка в % и EC_e в dS/m следующая: $V_{\text{Плотный остаток}} = 0,124X_{(EC_e)} - 0,206$; $R^2 = 0,957$. Тип засоления почвы хлоридно-сульфатный и сульфатно-хлоридный. Максимальное содержание солей отмечено в слое 80–100 см, там же, где и обнаружено скопле-

¹Руководство по управлению засоленными почвами / под ред. Р. Варгаса, Е. И. Панковой, С. А. Балюка, П. В. Красильникова, Г. М. Хасанхановой. Рим: ФАО, 2017. 153 с. ISBN: 978-92-5-409772-1.

²Методика по качественному и количественному учету засоленных земель колхозов и совхозов Узбекской ССР. Ташкент, 1981. 13 с.

ние гипса. Токсичных солей в этом слое содержится 0,455–0,717 % к массе почвы, а в остальных случаях 0,204–0,437 %.

Для выявления причин низкой водопроницаемости и фильтрации воды, препятствующих выщелачиванию солей из почвы при промывке, были привлечены литературные источники по влиянию карбонатов, гипса, поглощенных оснований (кальция и магния) на водопроницаемость и, соответственно, на солеотдачу почв.

Данные полевых и лабораторных исследований по свойствам почв обработаны статистически, определены уравнения связей между показателями.

Результаты и обсуждение. Для выявления причин и закономерностей формирования вышеописанных неблагоприятных свойств почв зоны исследований, помимо обработки собственных материалов, рассмотрены теоретические гипотезы, изучены опубликованные обзорные статьи по теме, материалы научно-аналитических экспериментальных исследований.

По данным исследований сотрудников Почвенного института им. В. В. Докучаева, территория Голодной степи (Зааминский конус выноса) характеризуется сложными мелиоративными условиями, определяемыми их литолого-гранулометрическим составом, гипсоносностью, окарбоначенностью и засоленностью почвенного профиля. По мнению Е. И. Панковой с соавторами, «свойства большинства почв шлейфа Зааминского конуса выноса, с точки зрения водно-физических показателей, следует оценить как исключительно неблагоприятные [1]. Таким образом, из-за высокой засоленности, гипсоносности и литологических особенностей почвы шлейфа Зааминского конуса выноса следует относить к трудномелиорируемым почвам» [1]. Это определение соответствует почвенно-мелиоративным условиям объекта наших исследований в Мирзаабадском районе, что подтверждают свойства почв опытного участка, которые отражены в таблице 1.

На рисунке 1 представлено фото внешнего вид почвенных образцов

с опытного участка. На фото видно, что структура почвы глыбистая и почва плотная.



Рисунок 1 – Внешний вид образцов глыбистой карбонатной засоленной почвы ОПУ Мирзаабадского района Сырдарьинской области (автор фото Д. Т. Кодиров)

Figure 1 – Overview of blocky carbonate saline soil samples of the Mirzaabad district of the Syrdarya region (photo by D. T. Kodirov)

Из анализа ряда опубликованных источников, опыта предыдущих исследований авторов по промывкам засоленных почв в Сырдарьинской области и рассмотрения почвенных данных опытного участка следует, что низкая водопроницаемость почвы является очень важным для промывки почвы показателем, отражающим совокупность негативных свойств почвы: карбонатность, плотность, наличие гипса, химического состава солей и соотношение катионов в ППК.

При емкости поглощения от 6,85 до 8,50 мг-экв/100 г почвы содержание Са в ППК составляет 18–54 %, при содержании Mg 50–73 %, т. е. Mg в ППК превышает Са в 1,1–4,0 раза. Высокое содержание обменного магния, значительно превышающее содержание поглощенного кальция, иллюстрирует рисунок 2.

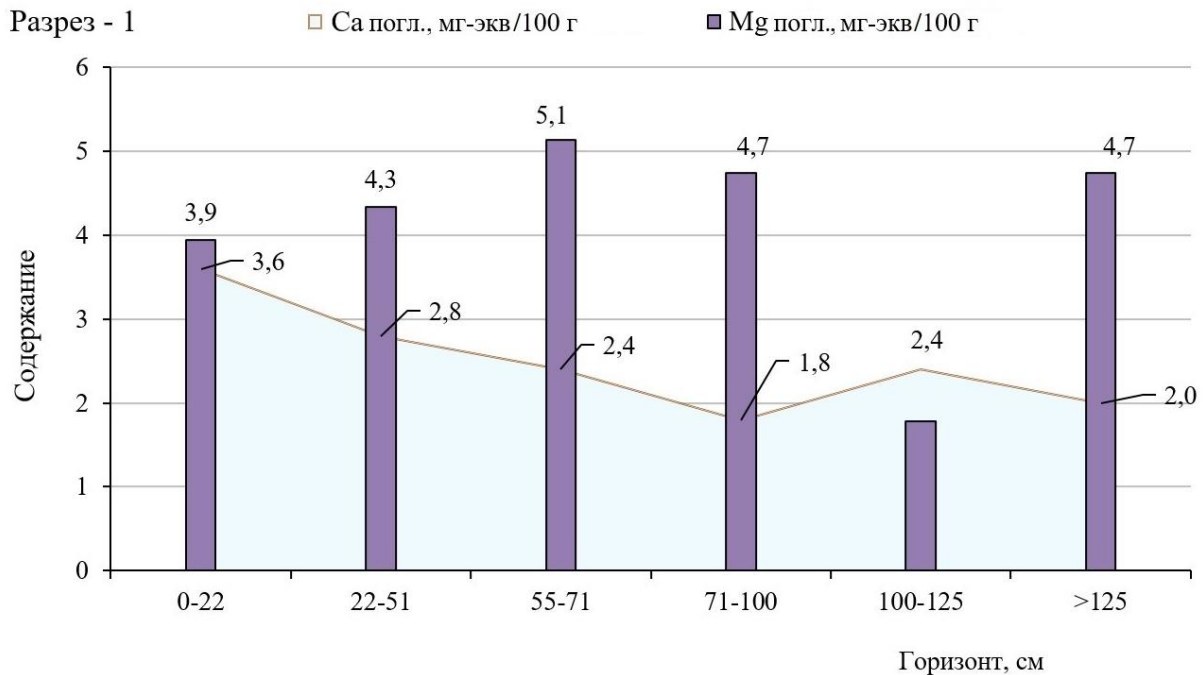


Рисунок 2 – Соотношение магния и кальция в почвенном поглощающем комплексе (количество поглощенного натрия 0,09–0,87 мг-экв/100 г почвы)

Figure 2 – Magnesium to calcium ratio in the soil absorption complex (amount of absorbed sodium 0.09–0.87 mg-eq/100 g of soil)

Показатели, приведенные в таблице 1 – объемная масса, инфильтрация, содержание карбонатов и вышеупомянутый Mg в ППК, не являются оптимальными, обеспечивающими плодородие почв.

Значительное превышение поглощенного магния над кальцием в почвах Голодной и Джизакской степей отмечает А. Р. Рамазанов и др. [2], назвав это явление магниевой солонцеватостью почв (таблица 4). В других литературных источниках [3] указывается: «В почвах с высоким содержанием карбонатов иногда наблюдается высокий обменный магний в ППК, что может влиять на структуру почвы, повышать щелочность и изменять водопроницаемость. Повышенный магний в ППК может ухудшать структуру почвы, снижать водопроницаемость и приводить к уплотнению, что негативно отражается на плодородии».

Таблица 4 – Емкость и состав поглощенных оснований орошаемых почв пустынной зоны Узбекистана²

Table 4 – Capacity and composition of absorbed bases of irrigated soils in the desert zone of Uzbekistan²

Регион	Почва	Горизонт	Емкость поглощения, мг-экв/100 г почвы	В % от емкости поглощения			
				Ca	Mg	K	Na
Голодная степь, 2001 г.	Новоорошаемые, суглинистые, луговые	Пахотный	8,90	23,37	53,03	6,85	16,74
		Подпахотный	8,27	19,35	65,30	8,10	7,25
	Орошаемые, супесчаные, сероземно-луговые	Пахотный	11,44	17,13	63,29	9,35	10,22
		Подпахотный	10,13	20,53	48,86	16,28	14,31
	Староорошаемые, легкосуглинистые, луговые	Пахотный	9,25	17,08	64,00	5,51	13,40
		Подпахотный	7,80	16,92	64,61	6,34	11,92
	Староорошаемые, среднесуглинистые, луговые	Пахотный	14,92	21,45	66,49	2,48	9,58
		Подпахотный	11,80	23,79	46,70	10,51	10,51
Джизакская степь, 2001 г.	Новоорошаемые, легкосуглинистые, сероземно-луговые	Пахотный	6,23	17,34	67,42	8,19	7,06
		Подпахотный	6,09	19,05	65,68	7,72	7,55
	Староорошаемые, легкосуглинистые, сероземно-луговые	Пахотный	6,18	31,71	55,01	9,06	4,70
		Подпахотный	5,18	30,11	54,05	10,81	5,01
Хорезмский оазис, 1972–2003 гг.	Аллювиально-луговые, легко-, среднесуглинистые	Пахотный	8,35	75,45	16,65	4,07	3,83
		Подпахотный	9,19	39,93	33,08	3,26	23,72
		Пахотный	7,63	67,23	23,33	5,50	3,93
		Подпахотный	9,59	41,50	35,87	2,92	19,71

В обширном обзоре научной литературы Л. А. Воеводина и О. В. Воеводин [4] отмечают: «Магний может влиять на физические свойства почв, которые особенно важны в орошаемых условиях: гранулометрический и агрегатный состав; структурное состояние; удельный и объемный вес; пористость; воздушные, водные, тепловые, электрические и радиоактивные свойства; твердость; пластичность; вязкость; липкость; текучесть; усадка;

сопротивление разрыву, сжатию, кручению; трение почвы о почву; трение почвы о металл; удельное сопротивление почвы при обработке; сопротивление почвы движению машин и орудий». Также авторы отмечают: «В литературных источниках постоянно встречаются упоминания об ухудшении физических свойств почв под влиянием высокого содержания магния. При этом почвы проявляют свойства, характерные для почв с высоким содержанием натрия (мононатриевых солонцов), в то же время содержание натрия в исследуемых почвах отмечается на невысоком уровне, т. е. почвы обладают физической солонцеватостью. Такие почвы с содержанием поглощенного магния 25 % и выше от емкости обмена некоторые исследователи еще со второй половины XX в. стали называть магниезиальными или магниевыми солонцами». В заключение авторы пишут: «Неблагоприятное влияние магния в основном не характерно для почв с соотношением обменных Ca : Mg больше 1; при преобладании Mg над Ca проявляется диспергация глины, увеличивается содержание глыбистых агрегатов, усиливается действие обменного натрия, которое начинает проявляться при содержании Mg более 30 % от суммы основных катионов. Особенно чувствительными к изменению содержания магния оказываются почвы с высоким содержанием смектита (монтмориллонита)».

Длительными исследованиями Т. П. Глуховой и В. А. Стрельниковой [5] установлено, что «в почвах, орошаемых минерализованными водами, поглощенного магния значительно больше натрия. С увеличением продолжительности использования этих вод количество обменного магния возрастает. Прогрессирующее накопление поглощенного натрия не было зарегистрировано. При замещении части поглощенного кальция на магний физические свойства почвы ухудшаются. Происходит сильное увеличение ее объемной массы до 1,5–1,6 г/см³, уменьшение порозности до 35–40 % и резкое снижение фильтрационной способности. Коэффициент фильтрации этих почв снижается в 3–4 раза по сравнению с почвой, поливавшейся оро-

сительной водой. В почвах с содержанием поглощенного магния более 50 % от емкости поглощения коэффициент дисперсности равен 10–20 %, в то время как в почвах, содержащих 30–50 % поглощенного натрия, он достигает 50–60 %. Итак, последствия замещения части поглощенных оснований на натрий вызывают сильную диспергацию почвы и, как следствие, снижение ее фильтрационной способности. Насыщение поглощающего комплекса магнием не диспергирует почву, а ухудшение фильтрации ее связано с уплотнением и цементацией почвенного профиля. Этот процесс авторы назвали магниевой слитизацией. Очень четко выражена она в почвах, длительно орошаемых минерализованными водами».

Также отмечается, что в щелочных почвах при повышении количества магния в ППК и изменении соотношения Ca : Mg в сторону магния могут возникать экологически неблагоприятные изменения: «дисгармония» почвенной среды³. Повышение магния в ППК поддерживает свойства солонцеватости почв и даже приводит в отдельных случаях к образованию особых почв – магниевых солонцов. В присутствии в почвенной среде карбонатов и бикарбонатов магния магнией вызывает повышение щелочности. При высоком содержании обменного магния возрастает растворимость гумусовых веществ и ухудшается структура почвы, снижается водопроницаемость, что отрицательно сказывается на водном режиме. При повышенном содержании обменного магния усиливается отрицательное действие обменного натрия при невысоком содержании его в почве.

По данным характеристики сильнозасоленных почв в Сардобинском районе Сырдарьинской области, приведенным в таблице 1, они также имели повышенное содержание магния в ППК (50 %), при соотношении Mg : Ca = 4,30 : 0,80. Промывками метровых монолитов почв очень большими нормами (20 тыс. м³/га) было достигнуто снижение содержания магния в ППК и соотношения Mg : Ca = 1,08 : 4,86 (таблица 1). Этот пример

³Белоусов А. А. Почвоведение: учеб. пособие. Красноярск: КрасГАУ, 2016. 225 с.

показывает, что при промывке небольшими нормами подачи воды решить проблему вытеснения обменного магния почвы (при высоком его содержании в ППК) с целью улучшения водно-физических свойств почвы, в том числе, повышения инфильтрации воды в почву, вряд ли возможно.

Анализ уравнений связи, полученных на основе обработки данных по двум почвенным разрезам на опытном участке (рисунок 3, таблица 5), показывает влияние кальция и магния в водной вытяжке на содержание поглощенного магния в исследуемых засоленных почвах (E_{Ce} в слое 0–70 см = 6,8–9,7 dS/m, E_{Ce} максимальная в слое 70–120 см – 13,8 dS/m).

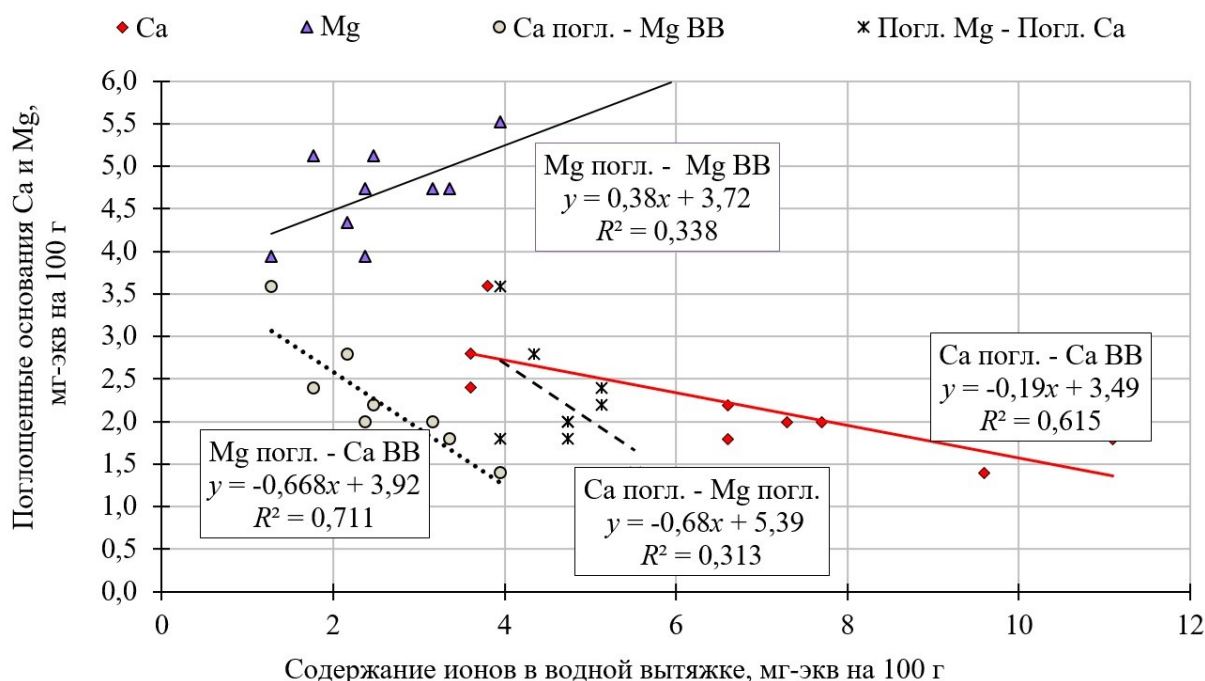


Рисунок 3 – Уравнения связи ионов Ca и Mg в почвенном поглощающем комплексе и в водной вытяжке по данным разрезов
Figure 3 – Equations for the relationship of Ca and Mg ions in the soil absorption complex and in water extract according to the cross-section data

Установлена обратная зависимость между содержанием поглощенного кальция и содержанием поглощенного магния ($y = -0,68x + 5,39$), как и с водорастворимым кальцием ($y = -0,19x + 3,49$) (рисунок 3, таблица 4).

Содержание поглощенного магния также отрицательно связано с наличием водорастворимого кальция в почве ($y = -0,67x + 3,92$).

Из данных предположительно следует, что поглощенный магний при

возрастании содержания кальция в водной вытяжке не вытесняется кальцием. Этот вопрос необходимо изучить в условиях динамики почвенных процессов (изменения засоления и ППК при орошении и промывке).

Таблица 5 – Уравнения связи ионов Са и Mg в ППК и в водной вытяжке по данным разрезов на опытном участке в Мирзаабадском районе

Table 5 – Equations for the relationship of Ca and Mg ions in SAC and in the aqueous extract according to the cross-section data at a test site in the Mirzaabad district

Показания по оси Y	Показания по оси X	Уравнение	Коэффициент корреляции
Mg погл.	Ca ВВ.	$y = -0,67x + 3,92$	$R^2 = 0,711$
Mg погл.	Mg ВВ.	$y = 0,38x + 3,72$	$R^2 = 0,338$
Ca погл.	Ca ВВ.	$y = -0,19x + 3,49$	$R^2 = 0,615$
Ca погл.	Mg погл.	$y = -0,68x + 5,39$	$R^2 = 0,313$

На рисунке 4 представлены две эмпирические зависимости, показывающие линейную положительную связь между засоленностью почвы по сумме токсичных солей и содержанием магния в ППК.

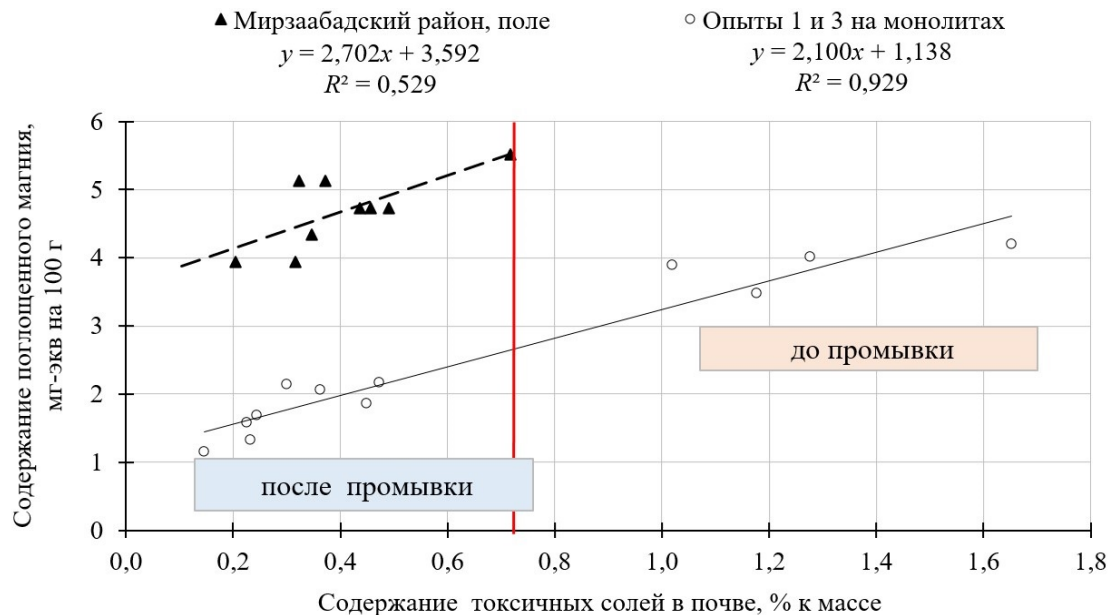


Рисунок 4 – Уравнения связи содержания магния в ППК от содержания токсичных солей в почве для условий Сырдарьинской области

Figure 4 – Equations for the relationship between magnesium content in SAC and toxic salt content in the soil for the Syrdarya region

Установленная закономерность указывает на возможность снижения магния в почвенном поглощающем комплексе при рассолении почвы.

Влияние повышенного содержания карбоната кальция в почвах описано в публикациях И. Н. Горохова, Е. И. Панкова, И. Н. Горохова, И. Н. Чурсина [6, 7]. Ссылаясь на издание ФАО⁴, авторы отмечают, что «при увеличении содержания CaCO₃ до 20 или 25 % осаждение карбоната в капиллярных трубках приводит к увеличению доли очень мелких пор и снижению перемещения влаги». В источнике⁴ указано, что «образование поверхностной корки может быть серьезной проблемой на новоорошаемых карбонатных почвах, особенно с низким содержанием органического вещества. Значения объемной массы 1,7 г/см³ или выше (за исключением очень песчаных почв) может указывать на наличие поверхностной корки». Вышеизложенное подтверждает проблемы влияния карбонатов на инфильтрацию почвы опытного поля в Мирзаабаде.

Таким образом, одной из главных причин высокой плотности верхних горизонтов почвы и низкой ее до промывки проницаемости на нашем участке предположительно является наличие карбонатов, составляющих около 20 % прямо с поверхности почвы (таблица 1).

Из вышеприведенного анализа материалов и изученных опубликованных работ относительно неблагоприятных фильтрационных и других свойств почв Голодной степи, их причин и закономерностей, выявленных авторами и исследователями⁵ [4–8], причинами плотности и низкой водопроницаемости почвы очевидно являются:

- наличие карбонатов около 20 %, чем и обусловлена очень высокая плотность верхнего слоя (до 1,78 г/см³);

⁴Soil Survey investigations for irrigation. FAO Soils Bulletin 42. Rome, 1979. 188 p.

⁵Рекомендации по мелиоративной оценке, освоению и использованию гипсоносных почв под орошаемое земледелие // Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева. М., 1979. 43 с.

- сочетание гипса с карбонатами в горизонте 80–100 см (скачкообразное увеличение содержание солей в этом слое указывает на факт, что именно этот горизонт не пропускает воду вниз);

- высокое содержание поглощенного магния (3,95–5,52 мг-экв/100 г), которое превышает содержание кальция в ППК от 1,1 до 4,0 раз.

Из вышеизложенных данных по неблагоприятным почвенным свойствам исследуемого участка и трактовки причин представляется, что эти земли очень трудно восстанавливать и повышать их продуктивность традиционными методами промывки слоем воды по чекам.

Тем не менее, исследования по улучшению и снижению засоленности этих почв промывками проводились. В основном они были направлены на повышение водопроницаемости почв с помощью рыхления почвы (Н. Х. Мансуров), в том числе рыхление в сочетании с улучшением химических свойств почвы путем применения таких подкисляющих органических добавок, как навоз, лигнин, полимерные удобрения (А. Р. Рамазанов, Б. Г. Остроброд)⁶. Кроме того, были проведены исследования по рассолению почв при выщелачивании солей осадками и дождеванием (А. В. Новикова, В. Я. Ладных, Г. М. Кривоносова)⁷, которое более эффективно вытесняет соли, чем рассоление почвы слоем воды [8, 9].

Исследуя в полевых опытах часть вышеперечисленных методов в новой усовершенствованной модификации, нам удалось обеспечить рассоление этих сложных почв при экономном использовании воды в трех технологиях.

1 Рассоление почвы во время проведения вегетационного полива

⁶Рекомендации по технологии промывок трудномелиорируемых засоленных почв Узбекистана с применением мелиоративной обработки и химмелиорантов. / Х. И. Якубов, А. Р. Рамазанов, Б. Г. Остроброд [и др.]. Ташкент, 1986. 24.с.

⁷Новикова А. В., Ладных В. Я., Кривоносова Г. М. Рекомендации по промывке дождеванием в комплексе с другими приемами рассоления и повышения плодородия засоленных почв зоны Краснознаменной оросительной системы. Харьков, 1981. 14 с.

хлопчатника по бороздам путем повышения выщелачивания солей (создание усиленного промывного режима орошения), за счет обработки борозд препаратом Биосолвент на основе органической кислоты ($\text{pH} = 2$). Затраты воды для промывной доли вместе с поливом составили $1000 \text{ м}^3/\text{га}$, расход препарата $5 \text{ л}/\text{га}$ (рисунок 5) [9].

2 Рассоление почвы осадками при сочетании предварительного глубокого рыхления почвы с осени ($0\text{--}70 \text{ см}$) с обработкой почвы вышеуказанным отечественным мелиорантом Биосолвент ($10 \text{ л}/\text{га}$ перед выпадением осадков по прогнозу (рисунок 6).

3 Промывка почвы по бороздам с применением предварительного рыхления почв на глубину 70 см с осени и с обработкой поверхности поля (борозд) препаратом перед подачей воды. Затраты воды $1400 \text{ м}^3/\text{га}$, расход препарата $5 \text{ л}/\text{га}$ (рисунок 7).

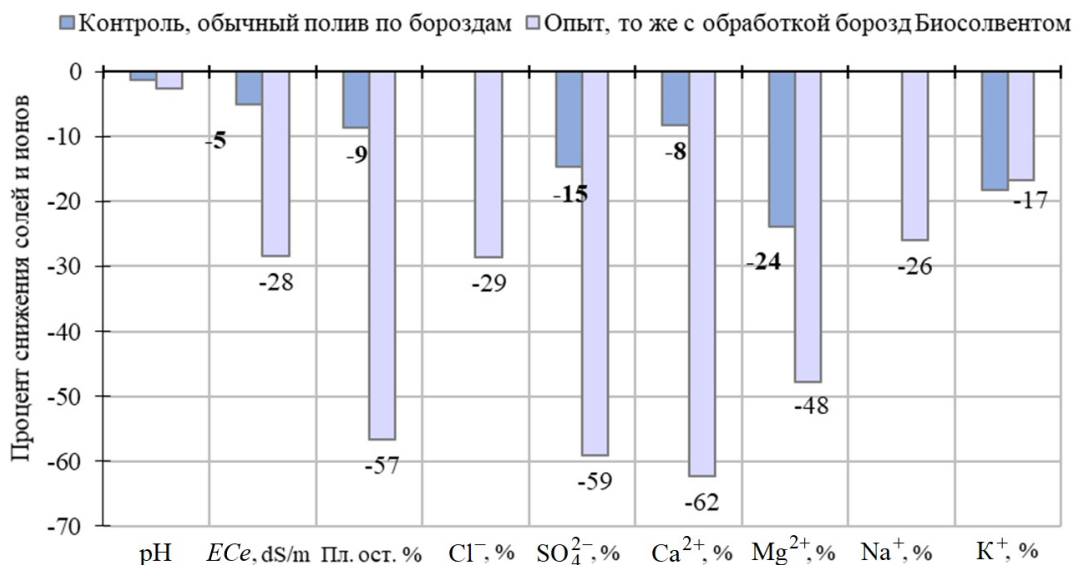


Рисунок 5 – Снижение содержания солей и ионов в слое $0\text{--}70 \text{ см}$ под влиянием применения Биосолвента при первом вегетационном поливе хлопчатника по бороздам (опыт описан в статье [10], среднесоленные почвы $ECe = 6\text{--}7 \text{ dS}/\text{m}$)

Figure 5 – Reduction in the content of salts and ions in the $0\text{--}70 \text{ cm}$ layer under the influence of the Biosolvent application during the first vegetative irrigation of cotton along furrows (the experiment is described in the article [10], moderately saline soils $ECe = 6\text{--}7 \text{ dS}/\text{m}$)

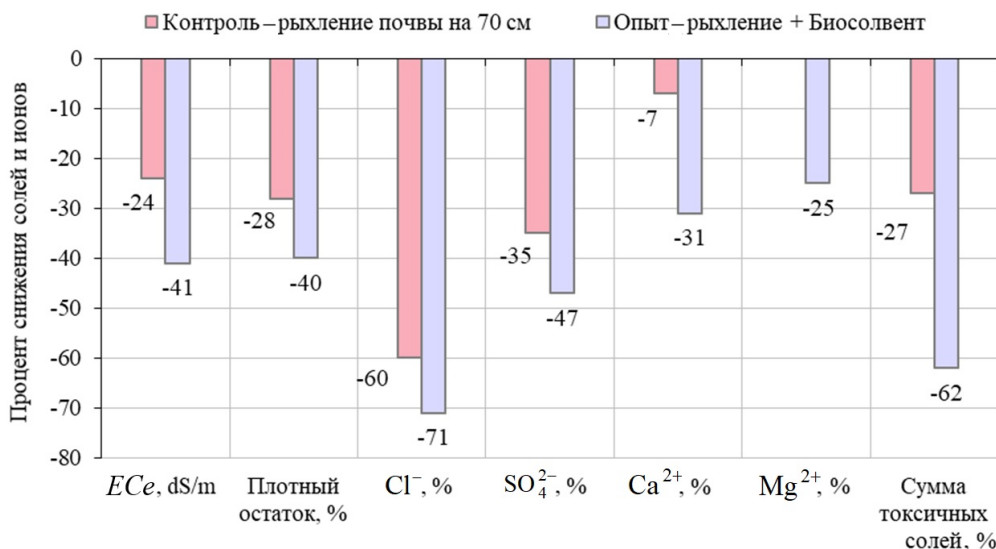


Рисунок 6 – Снижение содержания солей и ионов с осени 2022 г. к весне 2023 г. под воздействием: 174 мм атмосферных осадков, глубокого рыхления и опрыскивания почвы 10 % раствором препарата Биосолвент (расход препарата 10 л/га, E_{ce} исходное 9,0 dS/m, сильнозасоленные почвы)

Figure 6 – Reduction in salt and ion content since autumn 2022 to spring 2023 under the influence of 174 mm of precipitation, subsoiling, and soil spraying with a 10 % Biosolvent solution (product consumption rate 10 l/ha, initial E_{ce} 9.0 dS/m, highly saline soils)

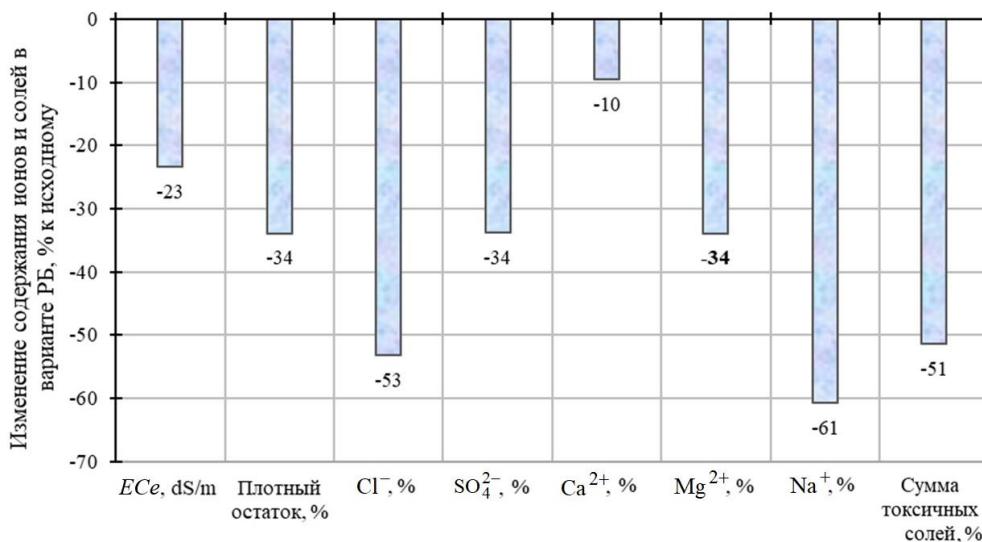


Рисунок 7 – Влияние совместного воздействия рыхления и Биосолвента на выщелачивание ионов и солей при промывке почвы по бороздам (среднее из трех повторностей, расход препарата 5 л/га, E_{ce} исходное 9,0 dS/m, сильнозасоленные почвы)

Figure 7 – Impact of the combined effect of subsoiling and Biosolvent on the ions and salts leaching during soil leaching along furrows (average of three replicates, product consumption 5 l/ha, initial E_{ce} 9.0 dS/m, highly saline soils)

Из данных, показанных на рисунках 5–7, видно, что описанная выше усовершенствованная технология рассоления почвы позволяет снизить засоление почвы по токсичным солям на 52–62 %, а количество водорастворимого магния – на 26–48 % от исходного.

Следовательно, применение предлагаемых технологий эффективно и является перспективным методом поддержания благоприятного солевого режима сложных карбонатных почв с повышенным содержанием обменного магния.

Таблица 6 показывает, что кроме карбонатов промывкой по бороздам с небольшими затратами воды (1400 м³/га) удалось снизить содержание токсичных солей на 51,3 %, том числе: Na₂SO₄ – на 61 %, NaCl – на 46 %, MgSO₄ – на 34 %.

Таблица 6 – Изменение содержания гипотетических солей при промывке почвы по бороздам (с рыхлением почвы и с обработкой Биосолвентом, подача воды 1400 м³/га)
Table 6 – Change in the content of hypothetical salts during soil leaching in furrows (with soil loosening and with Biosolvent treatment, water supply 1400 m³/ha)

Показатель		Повторность			Среднее	Среднее отклонение
		РБ2*	РБ5	РБ8		
1		2	3	4	5	6
Ca(HCO ₃) ₂	До промывки	0,010	0,012	0,008	0,010	0,00
	После промывки	0,012	0,011	0,015	0,013	0,00
	Разница	0,002	-0,001	0,006	0,003	0,00
	%	25,0	-6,7	80,0	32,8	31,5
CaSO ₄	До промывки	0,325	0,500	0,422	0,416	0,06
	После промывки	0,330	0,474	0,314	0,373	0,07
	Разница	0,005	-0,027	-0,108	-0,043	0,04
	%	1,5	-5,3	-25,5	-9,8	10,5
MgSO ₄	До промывки	0,238	0,238	0,226	0,234	0,01
	После промывки	0,137	0,214	0,113	0,154	0,04
	Разница	-0,101	-0,024	-0,113	-0,079	0,04
	%	-42,5	-10,0	-50,0	-34,2	16,1
Na ₂ SO ₄	До промывки	0,350	0,426	0,267	0,348	0,05
	После промывки	0,116	0,141	0,133	0,130	0,01
	Разница	-0,234	-0,285	-0,134	-0,218	0,06
	%	-66,8	-67,0	-50,3	-61,4	7,4

Продолжение таблицы 6

Table 6 continued

1		2	3	4	5	6
NaCl	До промывки	0,179	0,139	0,040	0,119	0,05
	После промывки	0,058	0,081	0,029	0,056	0,02
	Разница	-0,121	-0,058	-0,012	-0,063	0,04
	%	-67,7	-41,7	-28,6	-46,0	14,5
Сумма токсичных солей	До промывки	0,767	0,802	0,533	0,701	0,11
	После промывки	0,311	0,435	0,274	0,340	0,06
	Разница	-0,456	-0,367	-0,259	-0,361	0,07
	%	-59,5	-45,7	-48,5	-51,3	5,5
Примечание – *РБ2 – Рыхление + Биосолвент 2-я точка, РБ5 – Рыхление + Биосолвент 5-я точка, РБ8 – Рыхление + Биосолвент 8-я точка.						

Если использовать уравнение из рисунка 4 для почв Мирзаабадского района $y = 2,702x + 3,592$, $R^2 = 0,529$, $Y_{(\text{погл. магний})} = 2,702X_{(\Sigma \text{ токс. солей})} + 3,592$ и подставить значения суммы токсичных солей из таблицы 6 (до и после промывки), получаем позитивный прогноз: технология промывки по бороздам с применением рыхления и Биосолвента позволит снизить поглощенный магний на 1,0 мг-экв/100 г почвы (с 5,5 до 4,5 мг-экв/100 г).

Выводы

1 Выявлено, что одной из главных причин высокой плотности верхних горизонтов почвы и низкой ее водопроницаемости на опытном участке предположительно является наличие карбонатов, составляющих около 20 % прямо с поверхности почвы. Этот недостаток можно исправить глубоким рыхлением почвы. Исходя из расположения гипсового горизонта ниже 70 см, рыхление необходимо проводить на глубину до 1 м.

2 Выяснено, что наличие высокого содержания магния в почвенном поглощающем комплексе способствует снижению инфильтрации воды в почву.

3 Для улучшения фильтрационных свойств почвы необходимо снизить содержание поглощенного магния и увеличить содержание поглощенного кальция, что достижимо промывкой почвы высокими нормами при обеспеченном дренаже, что на сегодня не представляется возможным.

4 Исследованиями авторов обоснована возможность усиления выщелачивания солей и сокращения затрат воды при технологиях рассоления почвы, альтернативных промывке слоев воды: а) промывной режим орошения, б) использование атмосферных осадков, в) двухтактная промывка по бороздам с применением мелиоранта Биосолвент (рН~2), созданного на основе органической кислоты.

5 Выявлено, что с увеличением/снижением степени засоления почвы будет происходить и возрастание/снижение содержания поглощенного магния в ППК. Направленность этих процессов может ухудшать (или улучшать) водно-физические свойства почв. Этот «замкнутый круг» можно разорвать, регулярно контролируя засоление почвы и поддерживая отрицательный солевой баланс в почве, в т. ч. с применением предлагаемых технологий (пункт 4 выводов).

6 Установленная положительная корреляция между содержанием поглощенного и водорастворимого магния, а также подтвержденные экспериментальные данные об эффективности выщелачивания солей Биосолвентом указывают на возможность снижения содержания магния в почвенном поглощающем комплексе и, соответственно, улучшения свойств почвы.

Список источников

1. Особенности засоления и гипсоносности почв Джизакской степи (до начала ее мелиоративного освоения в 70-х годах XX в.). / Е. И. Панкова, В. А. Молодцов, И. Я. Ямнова [и др.]. М.: Медиа-Пресс, 2023. 264 с. ISBN: 978-5-901003-71-8. EDN: GXZBSH.

2. Рамазанов А., Ахатов А., Файзуллаева М. Н. Процессы осолонцевания орошаемых почв пустынной зоны Узбекистана // Ирригация и мелиорация. 2016. № 03(5). С. 34–36. EDN: ARFZXH.

3. Черноусенко Г. И., Хитров Н. Б., Панкова Е. И. Магний в засоленных гипсосодержащих почвах России // Почвоведение, 2023. № 7. С. 815–830. DOI: 10.31857/S0032180X23600026. EDN: VPHWGC

4. Воеводина Л. А., Воеводин О. В. Магний для почвы и растений // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2015. № 2(18). С. 70–81. EDN: UAGZZN.

5. Глухова Т. П., Стрельникова Г. А. Минерализованные воды Узбекистана как резерв орошения // Ташкент: ФАН, 1983 г. 136 с.

6. Горохова И. Н., Панкова Е. И. Карбонатные почвы: их свойства и положение в

разных классификациях // Экосистемы: экология и динамика. 2024. № 3. С. 52–66. DOI: 10.24412/2542-2006-2024-3-52-66. EDN: DWNLNA.

7. Горохова И. Н., Чурсин И. Н. Карбонаты в орошаемых почвах Прикаспийской низменности // Аридные экосистемы. 2021. Т. 27, № 2(87). С. 90–97. EDN: KOZULX.

8. Мансуров Н. Х. Почвенно-мелиоративное состояние почв юго-восточной части Голодной степи на примере совхоза «Пахтакор» // Тез. докл. I делегатского съезда почвоведов Узбекистана. Ташкент, 1990. С. 221.

9. Bresler E., McNeal B. L., Carter D. L. Management // Saline and Sodic Soils. Principles-Dynamics-Modeling. V. 10: Advanced Series in Agricultural Sciences. Berlin; Heidelberg: Springer, 1982. P. 166–211. DOI: 10.1007/978-3-642-68324-4_3.

10. Управление солевым режимом почв в условиях недостаточной водообеспеченности / А. Б. Уразкелдиев, Ю. И. Широкова, Г. К. Палуашова, Ф. Ф. Садиев, Д. Т. Кодиров // Вестник КPCY. 2023. Т. 23, № 12. С. 200–209. DOI: 10.36979/1694-500X-2023-23-12-200-209. EDN: GOSQXO.

References

1. Pankova E.I., Molodtsov V.A., Yamnova I.Ya. [et al.], 2023. *Osobennosti zasoleniya i gipsonosnosti pochv Dzhizakskoy stepi (do nachala yeye meliorativnogo osvoeniya v 70-kh godakh XX v)*. [Features of Soils Salinization and Gypsum Content of the Jizzakh Steppe (Before the Beginning of its reclamation Development in the 70s of the XX Century)]. Moscow, Media-Press Publ., 264 p., ISBN: 978-5-901003-71-8, EDN: GXZBSH. (In Russian).

2. Ramazanov A., Akhatov A., Fayzullaeva M.N., 2016. *Protsessy osolontsevaniya oroshaemykh pochv pustynnoy zony Uzbekistana* [Processes of solonetzization of irrigated soils in the desert zone of Uzbekistan]. *Irrigatsiya i melioratsiya* [Irrigation and Melioration], no. 03(5), pp. 34-36, EDN: ARFZXM. (In Russian).

3. Chernousenko G.I., Khitrov N.B., Pankova E.I., 2023. *Magniy v zasolennykh gipssoderzhashchikh pochvakh Rossii* [Magnesium in saline gypsum-bearing soils of Russia]. *Pochvovedenie* [Soil Science], no. 7, pp. 815-830, DOI: 10.31857/S0032180X23600026, EDN: VPHWGC. (In Russian).

4. Voevodina L.A., Voevodin O.V., 2015. *Magniy dlya pochvy i rasteniy* [Magnesium for soil and plants]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii* [Scientific journal of the Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems], no. 2(18), pp. 70-81, EDN: UAGZZN. (In Russian).

5. Glukhova T.P., Strelnikova G.A., 1983. *Mineralizovannye vody Uzbekistana kak rezerv orosheniya* [Mineralized Waters of Uzbekistan as an Irrigation Reserve]. Tashkent, FAN Publ., 136 p. (In Russian).

6. Gorokhova I.N., Pankova E.I., 2024. *Karbonatnye pochvy: ikh svoystva i polozhenie v raznykh klassifikatsiyakh* [Calcareous soils: their properties and definitions in different classifications]. *Ekosistemy: ekologiya i dinamika* [Ecosystems: Ecology and Dynamics], no. 3, pp. 52-66, DOI: 10.24412/2542-2006-2024-3-52-66, EDN: DWNLNA. (In Russian).

7. Gorokhova I.N., Chursin I.N., 2021. *Karbonaty v oroshaemykh pochvakh Prikaspiyskoy nizmennosti* [Carbonates in irrigated soils of the Caspian Lowland]. *Aridnye ekosistemy* [Arid Ecosystems], vol. 27, no. 2(87), pp. 90-97, EDN: KOZULX. (In Russian).

8. Mansurov N.Kh., 1990. *Pochvenno-meliorativnoe sostoyanie pochv yugo-vostochnoy chasti Golodnoy stepi na primere sovkhosa «Pakhtakor»* [Soil-reclamation state of the soils in the southeastern part of the Hungry Steppe on the example of the Pakhtakor state farm]. *Tez. dokl. I delegatskogo s"yezda pochvovedov Uzbekistana* [Abstracts of the I Delegate Congress of Soil Scientists of Uzbekistan]. Tashkent, 221 p.

9. Bresler E., McNeal B.L., Carter D.L., 1982. Management. Saline and Sodic Soils. Principles-Dynamics-Modeling. vol. 10: Advanced Series in Agricultural Sciences. Berlin, Heidelberg, Springer, pp. 166-211, DOI: 10.1007/978-3-642-68324-4_3.

10. Urazkeldiev A.B., Shirokova Yu.I., Paluashova G.K., Sadiyev F.F., Kodirov D.T., 2023. *Upravlenie solevym rezhimom pochv v usloviyakh nedostatochnoy vodoobespechennosti* [Management of the salt regime of soils under conditions of insufficient water supply]. *Vestnik KRSU* [Bulletin of KRSU], vol. 23, no. 12, pp. 200-209, DOI: 10.36979/1694-500X-2023-23-12-200-209, EDN: GOSQXO. (In Russian).

Информация об авторах

Ю. И. Широкова – ведущий научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт ирригации и водных проблем, Ташкент, Республика Узбекистан, yulia.i.shirokova@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5455-877X;

Г. К. Палуашова – старший научный сотрудник, доктор философии (PhD) по техническим наукам, Научно-исследовательский институт ирригации и водных проблем, Ташкент, Республика Узбекистан, gavhar2005@rambler.ru, ORCID: 0000-0001-7380-8367;

Д. Т. Кодиров – младший научный сотрудник, аспирант, Научно-исследовательский институт ирригации и водных проблем, Ташкент, Республика Узбекистан, qdt1004@umail.uz, ORCID: 0009-0004-5819-4861;

Ф. Ф. Садиев – старший научный сотрудник, доктор философии (PhD) по техническим наукам, Научно-исследовательский институт ирригации и водных проблем, Ташкент, Республика Узбекистан, fsf7711@mail.ru, ORCID: 0009-0007-8916-5088.

Information about the authors

Yu. I. Shirokova – Leading Researcher, Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Scientific Research Institute of Irrigation and Water Problems, Tashkent, Republic of Uzbekistan, yulia.i.shirokova@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5455-877X;

G. K. Paluashova – Senior Researcher, Doctor of Philosophy (PhD) of Technical Sciences, Scientific Research Institute of Irrigation and Water Problems, Tashkent, Republic of Uzbekistan, gavhar2005@rambler.ru, ORCID: 0000-0001-7380-8367;

D. T. Kodirov – Junior Research, Postgraduate Student, Scientific Research Institute of Irrigation and Water Problems, Tashkent, Republic of Uzbekistan, qdt1004@umail.uz, ORCID: 0009-0004-5819-4861;

F. F. Sadiyev – Senior Researcher, Doctor of Philosophy (PhD) of Technical Sciences, Scientific Research Institute of Irrigation and Water Problems, Tashkent, Republic of Uzbekistan, fsf7711@mail.ru, ORCID: 0009-0007-8916-5088.

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 12.01.2026; одобрена после рецензирования 04.02.2026; принята к публикации 25.03.2026.

The article was submitted 12.01.2026; approved after reviewing 04.02.2026; accepted for publication 25.03.2026.