

РОЛЬ МЕЛИОРАЦИИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА В ОБЕСПЕЧЕНИИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Научная статья

УДК 631.4:631.8

Влияние доз химических мелиорантов на степень засоления почвы и состав почвенного поглощающего комплекса

Алексей Александрович Бабенко¹, Александр Николаевич Бабичев²

^{1, 2}Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

¹al.al.al.1980@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7582-4907>

²BabichevAN2006@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1146-7530>

Аннотация. Цель: изучение влияния доз химических мелиорантов (фосфогипса и электролита травления стали) на степень засоления почвы и состав почвенного поглощающего комплекса при разном содержании гипса и получение уравнения для расчета внесения дозы мелиоранта в зависимости от содержания гипса в почве. **Материалы и методы.** Для проведения исследований были взяты почвы с различным химизмом, разной степенью засоления и солонцеватости, разным содержанием гипса по результатам почвенно-мелиоративного обследования рисовой системы в Центральной орошаемой зоне Ростовской области. **Результаты.** Установлено, что лучшие результаты в виде устранения магниевой солонцеватости в почвах с чеков 2 и 4 получены на варианте с внесением дозы фосфогипса 30 т/га: количество обменного магния снизилось на 12–13 % за счет вытеснения его обменным кальцием, содержание которого достигло оптимальных значений. На этих же почвах с внесением электролита травления стали разными дозами уменьшение количества магния варьировало от 4 до 8 %. Выявлено наибольшее снижение засоленности среднезагипсованных почв с чека 8 на вариантах с внесением электролита травления стали дозой 42 т/га в сочетании с промывкой и совместным внесением фосфогипса (15 т/га) и электролита травления стали (21 т/га) (на 17 и 16 % соответственно). Внесение только фосфогипса разными дозами меньше повлияло на этот показатель – от 4 до 7 %. Изменений в почвенном поглощающем комплексе на этих почвах не установлено. Используя данные исследований, получили уравнения, позволяющие рассчитывать дозы мелиорантов, которые способствуют оптимизации почвенного поглощающего комплекса. **Выводы.** Применение фосфогипса и электролита травления стали в различных дозах для почв, обладающих магниевой солонцеватостью, оптимизировало состав почвенного поглощающего комплекса. Внесение химических мелиорантов в сочетании с промывкой на гипсоносных почвах незначительно снизило степень засоления и содержание гипса – почвы остались в категории среднезагипсованных.

Ключевые слова: химизм засоления, солевой состав почвы, химические свойства почв, химическая мелиорация, гипсоносные почвы

Апробация результатов исследования: основные положения статьи доложены на Всероссийской научно-практической конференции «Роль мелиорации и водного хозяйства в обеспечении устойчивого развития земледелия» (г. Новочеркасск, 19 февраля 2025 г.).

Для цитирования: Бабенко А. А., Бабичев А. Н. Влияние доз химических мелиорантов на степень засоления почвы и состав почвенного поглощающего комплекса // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2025. Т. 95, № 1. С. 265–281.

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

Original article

Impact of chemical ameliorant doses on the degree of salinity and soil absorption complex composition

Alexey A. Babenko¹, Alexander N. Babichev²

^{1, 2}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

¹al.al.1980@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7582-4907>

²BabichevAN2006@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1146-7530>

Abstract. Purpose: to study the impact of chemical ameliorants (phosphogypsum and steel etching electrolyte) doses on the degree of salinity and the soil absorption complex composition with different gypsum contents and to obtain an equation for calculating the ameliorant dose depending on the gypsum content in the soil. **Materials and methods.** The studies were conducted on soils with different chemism, different degrees of salinity and solonetzism, different gypsum contents based on the results of a soil-reclamation survey of the rice system in the Central irrigated zone of Rostov region. **Results.** It was found that the best results in the form of eliminating magnesium solonetzism in soils from checks 2 and 4 were obtained with the variant with the application of phosphogypsum in a dose of 30 t/ha: the amount of exchangeable magnesium decreased by 12–13 % due to its displacement by exchangeable calcium, the content of which reached optimal values. On the same soils with the application of steel etching electrolyte in different doses, the decrease in the amount of magnesium varied from 4 to 8 %. The greatest decrease in salinity of medium-gypsum soils from check 8 was revealed in variants with the application of steel etching electrolyte in a dose of 42 t/ha in combination with washing and joint application of phosphogypsum (15 t/ha) and steel etching electrolyte (21 t/ha) (by 17 and 16 %, respectively). The application of only phosphogypsum in different doses had a lesser effect on this indicator – from 4 to 7 %. No changes in the soil absorption complex were found on these soils. Using the research data, equations that allow calculating the ameliorant doses that contribute to the optimization of the soil absorption complex were obtained. **Conclusions.** The application of phosphogypsum and steel etching electrolyte in various doses for soils with magnesium solonetzic content optimized the soil absorption complex composition. The application of chemical ameliorants in combination with leaching on gypseous soils slightly reduced the degree of salinity and gypsum content – the soils remained in the category of moderately gypsumed.

Keywords: salinization chemism, salt composition of soil, soil chemical properties, chemical reclamation, gypseous soils

Evaluation of the research results: the main provisions of the article were reported at the All-Russian scientific and practical conference “The role of land reclamation and water management in ensuring the sustainable development of agriculture” (Novocherkassk, February 19, 2025).

For citation: Babenko A. A., Babichev A. N. Impact of chemical ameliorant doses on the degree of salinity and soil absorption complex composition. *Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture*. 2025;95(1):265–281. (In Russ.).

Введение. В России из 221,8 млн га сельскохозяйственных угодий засолению и осолонцеванию подвержены 16,3 и 22,9 млн га соответственно^{1, 2} [1]. На Ростовскую область приходится 2,3 % от всех сельскохозяйственных угодий России, или 8,5 млн га, из них 5,96 млн га – пашня. Засоление и осолонцевание наблюдается на 29 % площади сельхозземель [2, 3].

Засоленные почвы имеют в своем профиле такое количество легко-растворимых солей, которое ухудшает их плодородие и отрицательно влияет на рост и развитие большинства растений. Засоление почв существенно ограничивает возделывание сельскохозяйственных культур – потери урожайности в засушливых районах достигают от 18–26 до 43 %. Изменение степени засоления определяется многими факторами, среди которых можно отметить неравномерность процессов водообеспечения почв, испарения воды из-за разных свойств самой почвы, микрорельефа поверхности, глубины почвенного профиля и др. [4–6].

Применение орошения для сельскохозяйственных культур, особенно водами неблагоприятного состава, влияет на различные почвенные процессы, в т. ч. на засоление. Нерациональное применение различных режимов и способов полива приводит к вторичному засолению, осолонцеванию почв, переувлажнению и процессам водной эрозии [1]. Эти процессы деградации подрывают многочисленные экосистемные функции. Деграция земель – одна из самых серьезных экологических проблем, с которыми человечество столкнулось в настоящее время [7–9].

Для повышения почвенного плодородия все большее значение приобретают разные типы мелиорации, улучшающие различные свойства почвы [10]. В зависимости от характера мелиоративных мероприятий различают следующие типы мелиорации земель: гидромелиорация, агролесоме-

¹О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ им. М. В. Ломоносова, 2023. 686 с.

²Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году». М.: Минприроды России; Кадастр, 2018. 888 с.

лиорация, культуртехническая мелиорация, химическая мелиорация, агро-фитомелиорация^{3,4} [11].

Большое значение для борьбы с негативными процессами в почве имеет химическая мелиорация. Она способствует сглаживанию разности в свойствах почв за счет нормализации реакции почвенной среды, снижает солонцеватость в верхних горизонтах почвы и ликвидирует переизбыток натрия в подпахотных слоях [12].

Расширение площадей гипсоносных почв, которое наблюдается в последнее время, диктует необходимость особого подхода к их освоению. Небольшое содержание гипса оказывает положительное влияние на свойства почв – блокируется образование солонцеватости, щелочности, нивелируется действие оросительных вод неудовлетворительного качества [1]. Но при большом количестве гипса в почве снижаются запасы продуктивной влаги, осложняются промывки, образуются суффозионные воронки [13, 14].

В качестве химического мелиоранта часто используют фосфогипс, положительное действие которого доказано многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных ученых [15–19].

Целью данного исследования является изучение влияния доз химических мелиорантов (фосфогипса и электролита травления стали) на степень засоления почвы и состав почвенного поглощающего комплекса при разном содержании гипса и получение уравнения для расчета внесения дозы мелиоранта.

Материалы и методы. Для проведения исследований были взяты почвы с различным химизмом, степенью засоления и солонцеватости, разным содержанием гипса, установленными в результате почвенно-мелиора-

³О внесении изменений в Федеральный закон «О мелиорации земель» и отдельные законодательные акты Российской Федерации [Электронный ресурс]: Федер. закон Рос. Федерации от 13 июня 2023 г. № 244-ФЗ: принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 25 мая 2023 г.: одобрен Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 7 июня 2023 г. Доступ из справ. правовой системы «Гарант».

⁴О мелиорации земель [Электронный ресурс]: Федер. закон от 10 янв. 1996 г. № 4-ФЗ (с изм. на 5 апр. 2016 г.). Доступ из справ. правовой системы «Гарант».

тивного обследования рисовой системы в Центральной орошаемой зоне Ростовской области.

Анализы почвенных образцов выполнялись в эколого-аналитической лаборатории РосНИИПМ по общепринятым методикам^{5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14}. Оценка почв проведена согласно Руководству по контролю и регулированию почвенного плодородия орошаемых земель¹⁵.

На основе результатов анализов определены физико-химические свойства почв для проведения лабораторного опыта (таблица 1).

В качестве мелиорантов использовались фосфогипс и электролит травления стали. Их подробные характеристики изложены авторами в предыдущих исследованиях [1].

⁵ГОСТ 28168-89. Почвы. Отбор проб [Электронный ресурс]. Введ. 1990-04-01. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-28168-89> (дата обращения: 10.01.2025).

⁶Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.

⁷ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки. Введ. 1986-01-01. М.: Стандартинформ, 2011. 4 с.

⁸ГОСТ 26424-85. Почвы. Метод определения ионов карбоната и бикарбоната в водной вытяжке [Электронный ресурс]. Введ. 1986-01-01. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

⁹ГОСТ 26425-85. Почвы. Методы определения иона хлорида в водной вытяжке [Электронный ресурс]. Введ. 1986-01-01. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

¹⁰ГОСТ 26426-85. Почвы. Методы определения иона сульфата в водной вытяжке [Электронный ресурс]. Введ. 1986-01-01. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

¹¹ГОСТ 26427-85. Почвы. Метод определения натрия и калия в водной вытяжке [Электронный ресурс]. Введ. 1986-01-01. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

¹²ГОСТ 26428-85. Почвы. Методы определения кальция и магния в водной вытяжке [Электронный ресурс]. Введ. 1986-01-01. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

¹³ГОСТ 26487-85. Почвы. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО [Электронный ресурс]. Введ. 1986-07-01. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

¹⁴ГОСТ 26950-86. Метод определения обменного натрия [Электронный ресурс]. Введ. 1987-07-01. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

¹⁵Руководство по контролю и регулированию почвенного плодородия орошаемых земель / В. Н. Щедрин, Г. Т. Балакай, Л. М. Докучаева, Р. Е. Юркова, О. Ю. Шалашова, Г. И. Табала; под общ. ред. В. Н. Щедрина. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2017. 137 с.

Таблица 1 – Физико-химические свойства почв для проведения лабораторного опыта

Table 1 – Physicochemical properties of soils for conducting laboratory experiments

Вариант опыта	Химизм засоления	Сумма ионов, %	рН водной суспензии	ΣППК, ммоль(экв)/100 г почвы	Гипс, %	% от ΣППК		
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
Поле 1 (чек 2)	Хлоридно-сульфатный	0,099	7,8	24,32	0,158	72	25	3
Поле 2 (чек 4)	Хлоридно-сульфатный	0,139	7,9	23,02	0,276	70	27	3
Поле 3 (чек 8)	Сульфатный	1,308	7,7	38,23	19,668	94	4	2
ППК – почвенный поглощающий комплекс.								

Дозы фосфогипса и электролита травления стали изучаются для устранения и снижения степени засоления и солонцеватости почв, а промывка – для удаления солей в нижние слои почвы.

Для математической обработки полученных результатов использовались общепринятые методики с применением персонального компьютера¹⁶. Для анализа полученных в результате исследований данных и построения 3D-графиков использована программа Statistica.

Схема внесения доз фосфогипса и электролита травления стали, расчетные нормы воды представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Схема опыта, изучаемые дозы мелиорантов и нормы воды
Table 2 – Experimental scheme, studied doses of ameliorants and water standards

Вариант опыта	Поле 1 (чек 2)		Поле 2 (чек 4)		Поле 3 (чек 8)	
	На всю площадь	На 1 кг почвы	На всю площадь	На 1 кг почвы	На всю площадь	На 1 кг почвы
1	2	3	4	5	6	7
Контроль (без мелиорации)	–	–	–	–	–	–
Ф	10 т/га	2,3 г	10 т/га	2,3 г	10 т/га	2,3 г
Ф	20 т/га	4,7 г	20 т/га	4,7 г	5 т/га	4,7 г
Ф	30 т/га	7,0 г	30 т/га	7,0 г	30 т/га	7,0 г
ЭТС	14 т/га	2,8 мл	14 т/га	2,8 мл	14 т/га	2,8 мл
ЭТС	26 т/га	5,3 мл	26 т/га	5,3 мл	7 т/га	5,3 мл
ЭТС	42 т/га	8,5 мл	42 т/га	8,5 мл	42 т/га	8,5 мл

¹⁶Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 4-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1979. 416 с.

Продолжение таблицы 2

Table 2 continued

1	2	3	4	5	6	7
$\frac{1}{2}$ Ф + $\frac{1}{2}$ ЭТС	5 т/га + 7 т/га	1,15 г + 1,4 мл	5 т/га + 7 т/га	1,15 г + 1,4 мл	5 т/га + 7 т/га	1,15 г + 1,4 мл
$\frac{1}{2}$ Ф + $\frac{1}{2}$ ЭТС	10 т/га + 13 т/га	2,35 г + 2,65 мл	10 т/га + 13 т/га	2,35 г + 2,65 мл	10 т/га + 13 т/га	2,35 г + 2,65 мл
$\frac{1}{2}$ Ф + $\frac{1}{2}$ ЭТС	15 т/га + 21 т/га	3,5 г + 4,25 мл	15 т/га + 21 т/га	3,5 г + 4,25 мл	15 т/га + 21 т/га	3,5 г + 4,25 мл
Полив для реак- ции и для про- мывки продук- тов реакции	—	—	—	—	300 м ³ /га 5700 м ³ /га	125 мл 1,5 л
Ф – фосфогипс; ЭТС – электролит травления стали.						

Результаты и обсуждения. Согласно данным таблицы 1, почвы че-ка 2 в исходном состоянии имеют хлоридно-сульфатный химизм засоления, не засолены и характеризуются незначительным содержанием гипса и присутствием магниевой солонцеватости. Внесение фосфогипса дозой 30 т/га и электролита травления стали дозой 42 т/га увеличило содержание солей почвы до 0,49 %, что соответствует слабому засолению почв. Содержание солей при внесении этих же мелиорантов, но меньшими дозами возросло менее значительно – примерно в два раза. На вариантах с внесением сочетаний мелиорантов половинными дозами увеличение содержания солей по сравнению с контрольным вариантом было отмечено только при внесении $\frac{1}{2}$ Ф + $\frac{1}{2}$ ЭТС (15 + 21 т/га).

В результате внесения химических мелиорантов произошло изменение содержания гипса в почве. Наибольшее его количество обнаружено на варианте с внесением фосфогипса дозой 30 т/га – 0,98 %. Почти в два раза ниже его содержание на вариантах с внесением ЭТС дозой 42 т/га и с внесением фосфогипса дозой 20 т/га, а на варианте с внесением максимального сочетания мелиорантов гипс находился в количестве 0,321 %. На остальных вариантах увеличение его содержания было незначительным (таблица 3).

Как видно из данных таблицы 3, химическая мелиорация способствовала оптимизации состава почвенного поглощающего комплекса. На всех

вариантах произошло увеличение количества обменного Са и снижение – обменного Mg. Это указывает на то, что применение фосфогипса и ЭТС способствует замещению магния кальцием в ППК.

Таблица 3 – Влияние мелиорантов на солевой состав и физико-химические свойства почвы чеков 2 и 4

Table 3 – Impact of ameliorants on the salt composition and soil physicochemical properties of checks 2 and 4

Вариант опыта	Доза, т/га	Сумма ионов, %	рН вод-ной сус-пензии	ΣППК, ммоль(экв)/100 г почвы	Гипс, %	% от ΣППК		
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
Чек 2								
Контроль	—	0,087	7,9	24,32	0,158	72	25	3
Ф	10	0,099	7,8	27,72	0,196	79	19	2
Ф	20	0,212	7,8	29,26	0,420	81	17	2
Ф	30	0,495	7,6	30,8	0,980	85	13	2
ЭТС	14	0,10	7,8	22,49	0,186	76	21	3
ЭТС	26	0,213	7,7	23,77	0,272	77	20	3
ЭТС	42	0,497	7,6	24,96	0,403	80	17	3
½ Ф + ½ ЭТС	5 + 7	0,095	7,8	24,59	0,164	77	20	3
½ Ф + ½ ЭТС	10 + 13	0,98	7,8	25,96	0,237	80	18	2
½ Ф + ½ ЭТС	15 + 21	0,228	7,7	27,26	0,321	82	16	2
Чек 4								
Контроль	—	0,090	8,0	23,02	0,276	70	27	3
Ф	10	0,096	8,0	24,14	0,375	77	20	3
Ф	20	0,240	7,9	25,52	0,504	83	15	2
Ф	30	0,290	7,7	26,8	0,598	84	14	2
ЭТС	14	0,047	8,0	21,26	0,276	78	18	4
ЭТС	26	0,112	8,0	22,48	0,271	82	14	4
ЭТС	42	0,138	7,9	23,60	0,267	83	14	3
½ Ф + ½ ЭТС	5 + 7	0,077	7,9	23,51	0,237	77	20	3
½ Ф + ½ ЭТС	10 + 13	0,165	7,8	24,85	0,254	82	15	3
½ Ф + ½ ЭТС	15 + 21	0,204	7,8	26,09	0,276	84	14	2

Особенно сильно это прослеживается на варианте с внесением фосфогипса дозой 30 т/га, где содержание кальция достигло оптимальных параметров – 85 % от суммы ППК. Внесение ЭТС дозой 42 т/га способствовало увеличению содержания Са в ППК до допустимого значения, внесение меньших доз ЭТС не принесло необходимого результата. Аналогичная ситуация просматривается и при внесении комбинации мелиорантов.

На основе полученных данных и оценки свойств почв с чека 2 построены трехмерные графики для расчета доз мелиорантов в зависимости

от содержания гипса в почве. На рисунках 1 и 2 показаны зависимости доз мелиорантов в почве при низком содержании гипса (чек 2) от содержания солей и обменного кальция в ППК.

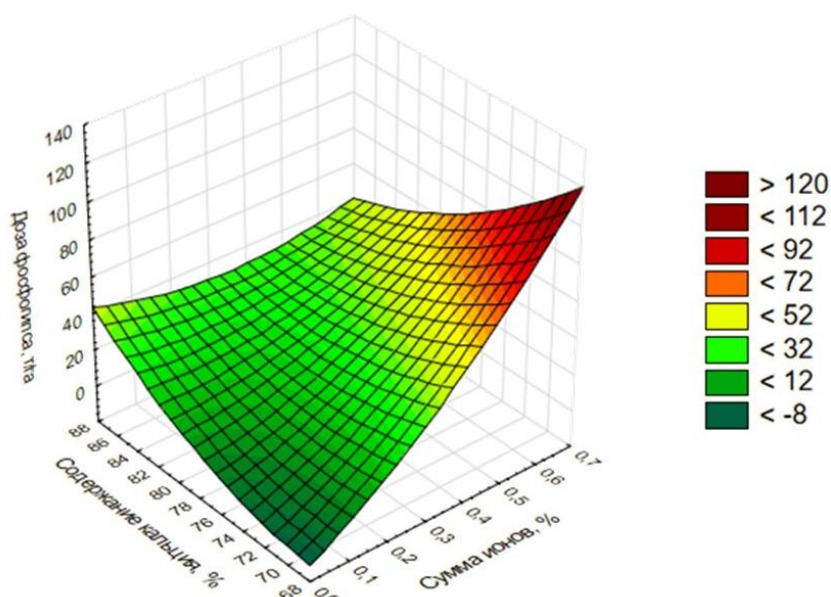


Рисунок 1 – Зависимость дозы фосфогипса от содержания солей и обменного кальция в почвенном поглощающем комплексе (чек 2)

Figure 1 – Dependence of the phosphogypsum dose on the salt content and exchangeable calcium in the soil absorption complex (check 2)

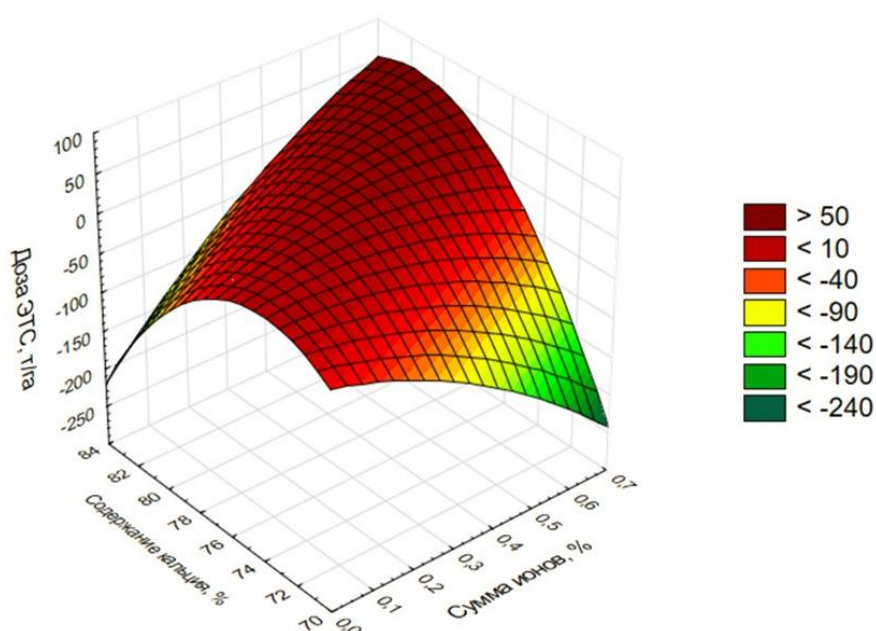


Рисунок 2 – Зависимость дозы электролита травления стали от содержания солей и обменного кальция в почвенном поглощающем комплексе (чек 2)

Figure 2 – Dependence of the steel etching electrolyte dose on the salt content and exchangeable calcium in the soil absorption complex (check 2)

Почвы чека 4 в исходном состоянии с несколько большим содержанием солей, но также не засолены, с содержанием гипса 0,276 % и присутствием магниевой солонцеватости. В данном чеке при внесении мелиорантов увеличение содержания солей аналогично чеку 2. Максимальные суммы солей здесь отмечены также на вариантах при внесении фосфогипса дозой 30 т/га и электролита травления стали дозой 42 т/га, однако они незначительно превышали показатели вариантов с внесением фосфогипса дозой 20 т/га и электролита травления стали дозой 26 т/га. На вариантах с внесением сочетаний мелиорантов дозами 10 + 13 и 15 + 21 т/га показатели содержания солей составляют 0,165 и 0,204 % соответственно (см. таблицу 3).

Увеличение содержания гипса после внесения мелиорантов не столь существенно, как в чеке 2. Наибольшее увеличение содержания гипса отмечено на вариантах с внесением фосфогипса дозами 20 и 30 т/га. На вариантах с внесением ЭТС различными дозами и сочетаний мелиорантов отмечалось незначительное изменение содержания гипса в почве от 0,237 до 0,276 %.

На почвах данного чека мелиорирующий эффект, заключающийся в увеличении содержания Са и уменьшении количества Mg, от внесения мелиорантов выражен в достаточной степени. Вытеснение магния кальцием произошло во всех вариантах опыта, однако внесение мелиорантов малыми дозами не способствовало замещению магния кальцием до допустимого значения (см. таблицу 3).

Для определения доз внесения мелиорантов (Ф и ЭТС) при содержании гипса в почве 0,3 % в зависимости от содержания солей и обменного кальция в ППК построены графики, представленные на рисунках 3 и 4.

В результате получены уравнения для расчета внесения дозы мелиоранта в зависимости от содержания гипса в почве, которая не будет отрицательно влиять на засоление почвы и будет способствовать оптимизации почвенного поглощающего комплекса (таблица 4).

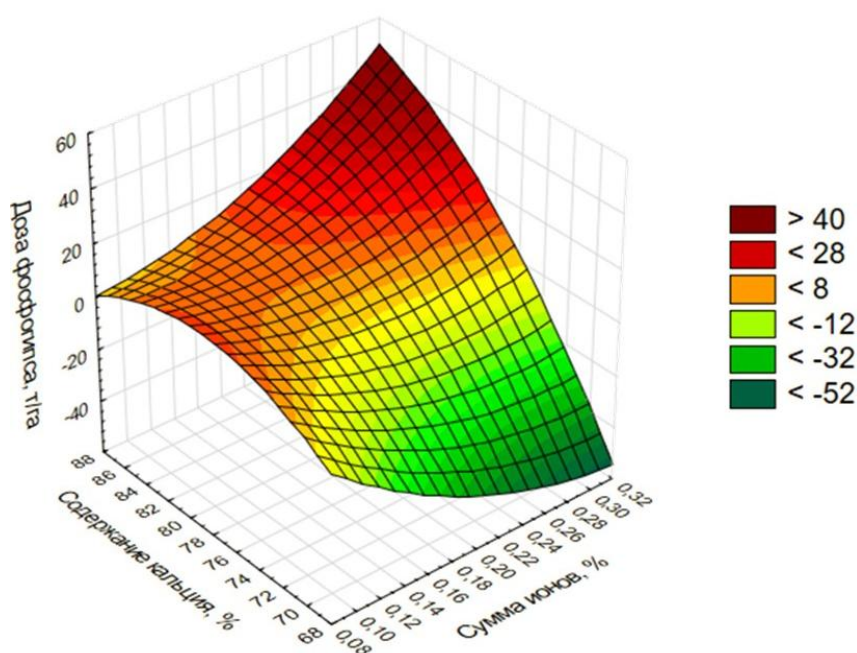


Рисунок 3 – Зависимость дозы фосфогипса от содержания солей и обменного кальция в почвенном поглощающем комплексе (чек 4)
Figure 3 – Dependence of the phosphogypsum dose on the salt content and exchangeable calcium in the soil absorption complex (check 4)

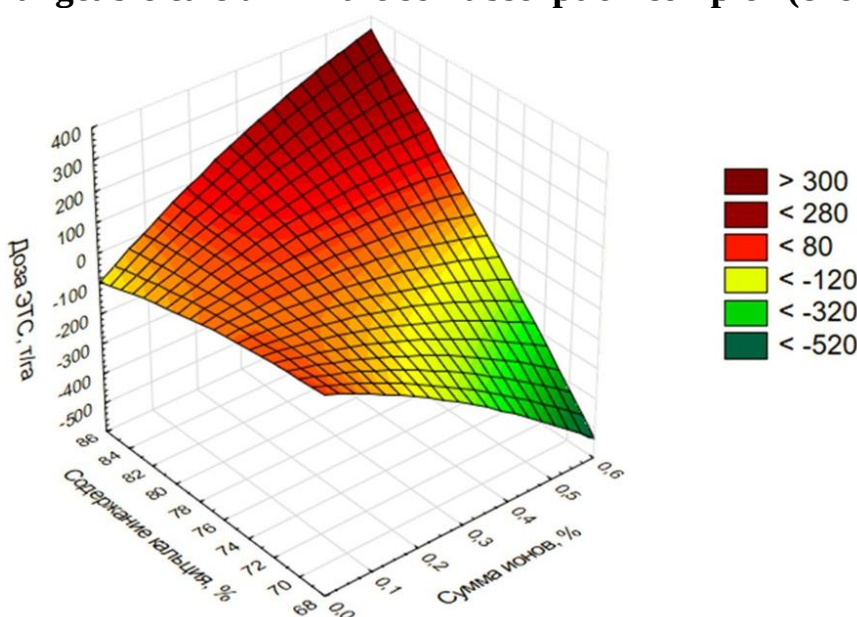


Рисунок 4 – Зависимость дозы электролита травления стали от содержания солей и обменного кальция в почвенном поглощающем комплексе (чек 4)
Figure 4 – Dependence of the steel etching electrolyte dose on the salt content and exchangeable calcium in the soil absorption complex (check 4)

Таблица 4 – Расчет доз мелиорантов в зависимости от содержания гипса в почве, степени засоления и количества обменного кальция в почвенном поглощающем комплексе

Table 4 – Calculation of ameliorant doses depending on the gypsum content in the soil, the degree of salinity and the amount of exchangeable calcium in the soil absorption complex

Доза мелиоранта, т/га	Уравнение
Доза Ф при содержании в почве гипса 0,15 %	$D_{\text{ф}} = 489,4848 + 771,1802x - 14,597y + 97,0093x^2 - 9,579xy + 0,1149y^2$
Доза Ф при содержании в почве гипса 0,30 %	$D_{\text{экс}} = -12118,9342 - 3671,1011x + 326,7114y - 256,983x^2 + 50,456xy - 2,2269y^2$
Доза ЭТС при содержании в почве гипса 0,15 %	$D_{\text{ф}} = -806,0503 - 19,11x + 17,8410y + 723,8507x^2 + 22,3193xy - 0,1564y^2$
Доза ЭТС при содержании в почве гипса 0,30 %	$D_{\text{экс}} = -1400,0851 - 7194,7689x + 44,5757y - 528,9608x^2 + 96,592xy - 0,3418y^2$
Примечание – x – содержание солей; y – содержание обменного кальция в ППК.	

Чек 8 представлен гипсоносными почвами, в которых содержание гипса составляет более 10 %, а на некоторых участках достигает 25 % [1]. Такие почвы относятся к категории среднезагипсованных. Для проведения опыта взяты почвы с 20 % содержания гипса и количеством солей 1,308 % в качестве контрольного образца. При таком высоком содержании солей в почве требуется проведение промывок для их удаления. Для усиления промывного эффекта были использованы фосфогипс и ЭТС. На вариантах с внесением различных доз фосфогипса максимальное снижение содержания солей (на 8 %) отмечено при внесении 30 т/га. При внесении ЭТС в чистом виде максимальный вынос солей составил 17 %, а в сочетании с фосфогипсом – 16 % [1].

Содержание гипса на всех вариантах уменьшилось, но не достигло даже 10 %, т. е. почвы остались в категории среднезагипсованных. На содержание обменных оснований в ППК внесение мелиорантов и проведение промывок не оказали существенного влияния (таблица 5).

Таблица 5 – Влияние мелиорантов и промывки на физико-химические свойства почвы чека 8 (лабораторный опыт)

Table 5 – Impact of ameliorants and leaching on the soil physicochemical properties in check 8 (laboratory experiment)

Вариант опыта	Доза, т/га	Сумма ионов, %	рН водной суспензии	ΣППК, ммоль(экв)/100 г почвы	Гипс, %	% от ΣППК		
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
До промывки								
Контроль	—	1,243	7,7	38,23	19,668	94	4	2
Ф	10	1,269	7,7	38,96	20,02	94	4	2
Ф	20	1,290	7,7	39,53	20,45	94	4	2
Ф	30	1,34	7,6	40,29	20,61	95	3	2
ЭТС	14	1,289	7,7	38,55	19,83	94	4	2
ЭТС	26	1,32	7,7	38,01	19,95	94	4	2
ЭТС	42	1,400	7,7	37,51	20,06	95	3	2
½ Ф + ½ ЭТС	5 + 7	1,282	7,7	38,68	19,89	94	4	2
½ Ф + ½ ЭТС	10 + 13	1,303	7,7	39,15	20,08	94	4	2
½ Ф + ½ ЭТС	15 + 21	1,371	7,7	39,62	20,22	94	4	2
После проведения промывки								
Контроль	—	1,243	7,7	38,23	19,668	94	4	2
Ф	10	1,189	7,7	38,40	17,885	94	4	2
Ф	20	1,172	7,7	38,53	15,647	94	4	2
Ф	30	1,149	7,6	38,69	14,213	95	3	2
ЭТС	14	1,183	7,7	38,55	16,180	94	4	2
ЭТС	26	1,052	7,7	38,01	13,874	94	4	2
ЭТС	42	1,032	7,7	37,51	11,039	95	3	2
½ Ф + ½ ЭТС	5 + 7	1,103	7,7	38,42	17,046	94	4	2
½ Ф + ½ ЭТС	10 + 13	1,072	7,7	38,55	15,652	94	4	2
½ Ф + ½ ЭТС	15 + 21	1,042	7,7	38,69	12,422	94	4	2

Выводы. Установлено, что лучшие результаты в виде устранения магниевой солонцеватости в почвах с чеков 2 и 4 (низкое содержание гипса) получены на варианте с внесением дозы фосфогипса 30 т/га – содержание обменного магния снизилось на 12–13 % за счет вытеснения его обменным кальцием, количество которого достигло оптимальных параметров. На этих же почвах с внесением электролита травления стали разными дозами уменьшение содержания магния в ППК варьировало от 4 до 8 %. Получены уравнения, позволяющие рассчитывать дозы мелиорантов, которые способствуют оптимизации ППК.

Определено наибольшее снижение засоленности сильнозагипсован-

ных почв с чека 8 на вариантах с внесением электролита травления стали дозой 42 т/га в сочетании с промывкой и совместным внесением фосфогипса 15 т/га и электролита травления стали 21 т/га – на 17 и 16 % соответственно. Внесение только фосфогипса разными дозами оказало меньшее влияние на этот показатель – от 4 до 7 %. Изменений в ППК на этих почвах не установлено.

Применение фосфогипса и электролита травления стали в различных дозах в почвах, обладающих магниевой солонцеватостью, оптимизировало состав почвенного поглощающего комплекса. Внесение химических мелиорантов в сочетании с промывкой в гипсоносных почвах незначительно снизило степень засоления и содержание гипса – почвы остались в категории среднезагипсованных.

Список источников

1. Бабенко А. А. Влияние фосфогипса и электролита травления стали на химические свойства почв рисовых чеков в условиях Ростовской области // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2024. Т. 14, № 1. С. 71–88. URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1425> (дата обращения: 16.01.2025). DOI: 10.31774/2712-9357-2024-14-1-71-88. EDN: JVCJDM.
2. Богачёв И. В. Ростовская область. Хозяйство. Сельское хозяйство [Электронный ресурс]. URL: <https://bigenc.ru/c/rostovskaia-oblast-khoziaistvo-selskoe-khoziaistvo-02930a?ysclid=lzgl2go1vv468993157> (дата обращения: 18.07.2024).
3. Национальный атлас почв Российской Федерации / Н. А. Аветов [и др.]. М.: Астрель, 2011. 632 с. EDN: TIFKYN.
4. Изменение засоления почв во времени и пространстве / М. Е. Котенко, А. Е. Сорокин, В. И. Савич, Г. Б. Подволоцкая, Ш. Мохаммади // Плодородие. 2020. № 1. С. 43–48. DOI: 10.25680/S19948603.2020.112.13. EDN: CYZGPH.
5. Засоление почвы и его влияние на растения / В. В. Иванищев, Т. Н. Евграфкина, О. И. Бойкова, Н. Н. Жуков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 3. С. 28–42. EDN: BSJTXM.
6. Сатторова М. М., Ганиева Ф. А. Влияние засоления почв на экологическое состояние орошаемых земель и физиологические процессы, протекающие в растениях // Вестник науки и образования. 2020. № 21-2(99). С. 127–129. EDN: PXPPGF.
7. Орошение и почвенное плодородие в различных климатических зонах / Р. С. Масный, Г. Т. Балакай, Л. М. Докучаева, А. Н. Бабичев, Р. Е. Юркова, В. А. Монастырский, В. И. Ольгаренко; ФГБНУ «РосНИИПМ». Новочеркасск, 2023. 225 с. Деп. в ВИНИТИ РАН 03.04.23, № 9-B2023. DOI: 10.36535/0202-6120-2023-02-9-2023. EDN: VWROAW.
8. Pravalie R. Exploring the multiple land degradation pathways across the planet // Earth-Science Reviews. 2021. Vol. 220. 103689. DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103689. EDN: HZKKCY.
9. Evolutionary overview and prediction of themes in the field of land degradation / X. Lu, Y. Zhang, C. Lin, F. Wu // Land. 2021. Vol. 10, iss. 3. P. 1–23. DOI: 10.3390/land10030241. EDN: XZZWFO.

10. Бабичев А. Н., Бабенко А. А. Влияние мелиорации почв на их плодородие // Инновационные технологии в АПК: теория и практика: сб. ст. IX Междунар. науч.-практ. конф., 15–16 марта 2023 г. Пенза: ПГАУ, 2023. С. 9–12. EDN: HVENOE.

11. Бабичев А. Н., Бабенко А. А. Влияние различных типов и видов мелиорации на восстановление и повышение плодородия деградированных почв // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2022. Т. 12, № 1. С. 157–176. URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1266> (дата обращения: 08.12.2024). DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-1-157-176. EDN: INKOLR.

12. Аманбаева Б. Ш., Бекбаев Р. К., Джайсамбекова Р. А. Комплексная мелиорация деградированных орошаемых земель юга Казахстана // Наука и мир. 2017. Т. 1, № 11(51). С. 56–59. EDN: FMUZRM.

13. Минашина Н. Г., Егоров В. В. Мелиоративные особенности и классификации гипсоносных почв // Почвоведение. 1975. № 10. С. 74–85.

14. Ямнова И. А., Панкова Е. И. Гипсовые новообразования и формирующие их элементарные почвообразовательные процессы // Почвоведение. 2013. № 12. С. 1423–1436. DOI: 10.7868/S0032180X13120125. EDN: REKBYD.

15. Efficiency of chemical ameliorants for reclamation of bore mud and solonchic soils of Siberia and Ural / L. Scipin, V. Petukhova, Z. Monakhova, D. Scipin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 337. 012030. DOI: 10.1088/1755-1315/337/1/012030. EDN: SXBBOE.

16. Перспективы применения фосфогипса как химического мелиоранта в земледелии Российской Федерации / Р. В. Некрасов, Н. И. Аканова, А. Х. Шеуджен, М. М. Визирская // Международный сельскохозяйственный журнал. 2019. № 6(372). С. 93–98. DOI: 10.24411/2587-6740-2019-16115. EDN: HACJOD.

17. Куликова Е. В., Горбунова Н. С., Куликов Ю. А. Влияние мелиорации фосфогипсом на экологическое состояние черноземов Каменной степи // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2023. Т. 16, № 2(77). С. 81–89. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_2_81. EDN: HXJXK.

18. Trotsenko I., Korchevskaya Y. Agronomic and economic efficiency of chemical reclamation of solonchik land areas // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 175. 12003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017512003>. EDN: VXSPHE.

19. Ибрагимов С. К., Джамалова Р. Х., Мустафаев М. Г. Действие органоминерального мелиоранта при промывках на оздоровление солонцеватых почв Азербайджана // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2023. Т. 13, № 1. С. 73–86. URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1341> (дата обращения: 08.12.2023). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-1-73-86>. EDN: FFLYPW.

References

1. Babenko A.A., 2024. [The effect of phosphogypsum and steel pickling electrolyte on chemical characteristics of paddy soils in the conditions of Rostov region]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 14, no. 1, pp. 71-88, available: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1425> [accessed 16.01.2025], <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-1-71-88>, EDN: JVCJDM. (In Russian).

2. Bogachev I.V., Avetov N.A. *Rostovskaya oblast'. Khozyaystvo. Sel'skoe khozyaystvo* [Rostov Region. Economy. Agriculture]. Available: <https://bigenc.ru/c/rostovskaia-oblast-khoziaistvo-selskoe-khoziaistvo-02930a?ysclid=lzgl2go1vv468993157> [accessed 18.07.2024]. (In Russian).

3. Avetov N.A. [et al.], 2011. *Nacional'nyj atlas pochv Rossijskoj Federacii* [National Soil Atlas of the Russian Federation]. Moscow, Astrel' Publ., 632 p., EDN: TIFKYN. (In Russian).

4. Kotenko M.E., Sorokin A.E., Savich V.I., Podvolotskaya G.B., Mohammadi Sh., 2020. *Izmenenie zasoleniya pochv vo vremeni i prostranstve* [Change in soil salinization in time and in

space]. *Plodorodie* [Fertility], no. 1, pp. 43-48, DOI: 10.25680/S19948603.2020.112.13. EDN: CYZGPH. (In Russian).

5. Ivanishchev V.V., Evgrashkina T.N., Boykova O.I., Zhukov N.N., 2020. *Zasolenie pochvy i ego vliyanie na rasteniya* [Soil salinization and its effect on plants]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Bulletin of Tula State University. Earth Sciences], no. 3, pp. 28-42, EDN: BSJTXM. (In Russian).

6. Sattorova M.M., Ganieva F.A., 2020. *Vliyanie zasoleniya pochv na ekologicheskoe sostoyanie oroshaemykh zemel' i fiziologicheskie protsessy, protekayushchie v rasteniyakh* [Influence of soil salinization on the ecological state of irrigated lands and physiological processes occurring in plants]. *Vestnik nauki i obrazovaniya* [Bulletin of Science and Education], no. 21-2(99), pp. 127-129, EDN: PXPPGF. (In Russian).

7. Masny R.S., Balakai G.T., Dokuchaeva L.M., Babichev A.N., Yurkova R.E., Monastyrsky V.A., Olgarenko V.I., 2023. *Oroshenie i pochvennoe plodorodie v razlichnykh klimaticheskikh zonakh* [Irrigation and Soil Fertility in Different Climatic Zones]. Novocherkassk, 225 p., deposited to VINITI RAS on 03.04.23, no. 9-B2023, DOI: 10.36535/0202-6120-2023-02-9-2023, EDN: VWROAW. (In Russian).

8. Pravalie R., 2021. Exploring the multiple land degradation pathways across the planet. *Earth-Science Reviews*, vol. 220. 103689, DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103689, EDN: HZKKCY.

9. Lu X., Zhang Y., Lin C., Wu F., 2021. Evolutionary overview and prediction of themes in the field of land degradation. *Land*, vol. 10, iss. 3, pp. 1-23, DOI: 10.3390/land10030241, EDN: XZZWFO.

10. Babichev A.N., Babenko A.A., 2023. *Vliyanie melioratsii pochv na ikh plodorodie* [The effect of soil reclamation on their fertility]. *Innovatsionnye tekhnologii v APK: teoriya i praktika: sb. st. IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Innovative Technologies in the Agro-Industrial Complex: Theory and Practice: Proceed. of the IX International Scientific-Practical Conference]. Penza, PGAU Publ., pp. 9-12, EDN: HVENOE. (In Russian).

11. Babichev A.N., Babenko A.A., 2022. *Vliyanie razlichnykh tipov i vidov melioratsii na vosstanovlenie i povyshenie plodorodiya degradirovannykh pochv* [The effect of various kinds and types of irrigation on restoration and increase of fertility of degraded soils]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 12, no. 1, pp. 157-176, available: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1266> [accessed 08.12.2024], DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-1-157-176, EDN: INKOLR. (In Russian).

12. Amanbaeva B.Sh., Bekbaev R.K., Dzhasambekova R.A., 2017. *Kompleksnaya melioratsiya degradirovannykh oroshaemykh zemel' yuga Kazakhstana* [Integrated reclamation of degraded irrigated lands in the south of Kazakhstan]. *Nauka i mir* [Science and the World], vol. 1, no. 11(51), pp. 56-59, EDN: FMUZRM. (In Russian).

13. Minashina N.G., Egorov V.V., 1975. *Meliorativnye osobennosti i klassifikatsii gipsonosnykh pochv* [Reclamation features and classifications of gypsum-containing soils]. *Pochvovedenie* [Soil Science], no. 10, pp. 74-85. (In Russian).

14. Yamnova I.A., Pankova E.I., 2013. *Gipsovye novoobrazovaniya i formiruyushchie ikh elementarnye pochvoobrazovatel'nye protsessy* [Gypsic pedofeatures and elementary pedogenetic processes of their formation]. *Pochvovedenie* [Soil Science], no. 12, pp. 1423-1436, DOI: 10.7868/S0032180X13120125, EDN: REKBYD. (In Russian).

15. Scipin L., Petukhova V., Monakhova Z., Scipin D., 2019. Efficiency of chemical ameliorants for reclamation of bore mud and solonetzic soils of Siberia and Ural. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 337, 012030, DOI: 10.1088/1755-1315/337/1/012030, EDN: SXBBOE.

16. Nekrasov R.V., Akanova N.I., Sheudzhen A.Kh., Vizirskaya M.M., 2019. *Perspektivy primeneniya fosfogipsa, kak khimicheskogo melioranta, v zemledelii Rossiiskoi Federatsii* [Pro-

spects of applying phosphogyps as a chemical ameliorant in agriculture of the Russian Federation]. *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal* [International Agricultural Journal], no. 6(372), pp. 93-98, <https://doi.org/10.24411/2587-6740-2019-16115>, EDN: HACJOD. (In Russian).

17. Kulikova E.V., Gorbunova N.S., Kulikov Yu.A., 2023. *Vliyanie melioratsii fosfogipsom na ekologicheskoe sostoyanie chernozemov Kamennoy stepi* [Effect of phosphogypsum reclamation on the ecological status of chernozem soils of the Kamennaya Steppe]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bullet. of Voronezh State Agrarian University], vol. 16, no. 2(77), pp. 81-89, https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2023_2_81, EDN: HXIJXK. (In Russian).

18. Trotsenko I., Korchevskaya Y., 2020. Agronomic and economic efficiency of chemical reclamation of solonchaks land areas. *E3S Web of Conferences*, vol. 175, 12003, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017512003>, EDN: VXSPHE.

19. Ibragimov S.K., Jamalova R.Kh., Mustafayev M.G., 2023. *Deystvie organomineral'nogo melioranta pri promyvках na ozdorovlenie solontsevatykh pochv Azerbaydzhana* [The impact of the organomineral ameliorant during washings (leaching) on the alkaline soil improvement in Azerbaijan]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 13, no. 1, pp. 73-86, available: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1341> [accessed 08.12.2023], <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-1-73-86>, EDN: FFLYPW. (In Russian).

Информация об авторах

А. А. Бабенко – научный сотрудник, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация, al.al.al.1980@yandex.ru, AuthorID: 1041758, ORCID ID: 0000-0002-7582-4907;

А. Н. Бабичев – ведущий научный сотрудник, доктор сельскохозяйственных наук, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация, babichevan2006@yandex.ru, AuthorID: 195832, ORCID ID: 0000-0003-1146-7530.

Information about the authors

A. A. Babenko – Researcher, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation, al.al.al.1980@yandex.ru, AuthorID: 1041758, ORCID ID: 0000-0002-7582-4907;

A. N. Babichev – Leading Researcher, Doctor of Agricultural Sciences, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation, babichevan2006@yandex.ru, AuthorID: 195832, ORCID ID: 0000-0003-1146-7530.

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 10.02.2025; одобрена после рецензирования 24.02.2025; принята к публикации 19.03.2025.

The article was submitted 10.02.2025; approved after reviewing 24.02.2025; accepted for publication 19.03.2025.