



ВЛИЯНИЕ РАСТЕНИЙ-ФИТОМЕЛИОРАНТОВ И КОНСОРЦИУМА СОЛЕУСТОЙЧИВЫХ БАКТЕРИЙ НА СОЛЕВОЙ РЕЖИМ ПОЧВ

¹Смирнова И. Э. ORCID ID 0000-0001-5854-1529,

¹Баймаханова Г. Б. ORCID ID 0000-0001-5416-3209,

²Алдабергенов М. К. ORCID ID 0000-0001-6421-2668,

¹Рахметова Я. У. ORCID ID 0009-0007-8259-7953

¹Товарищество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственный центр микробиологии и вирусологии»,
Алматы, Республика Казахстан;

²Товарищество с ограниченной ответственностью
«Научно-производственный центр агроинженерии»,
Алматы, Республика Казахстан, e-mail: iesmirnova@mail.ru

Во всем мире отмечается рост засоления почв, которое отрицательно влияет на продуктивность культур и представляет серьезную угрозу продовольственной безопасности стран. Целью работы было изучение влияния консорциума солетолерантных азотфиксирующих и фосфатмобилизирующих бактерий на рост и развитие растений-фитомелиорантов в условиях солевого стресса и исследование совместного влияния растений-фитомелиорантов и консорциума бактерий на солевой режим почв. В качестве растений-фитомелиорантов использовали донник желтый (*Melilotus officinalis* L.), житняк (*Agropyron cristatum* L.) и люцерну (*Medicago sativa* L.). В опытах использовали два солетолерантных штамма азотфиксирующих и фосфатмобилизирующих бактерий. В результате проведенных исследований показано, что применение консорциума бактерий для инокуляции семян повышает всхожесть, стимулирует рост и увеличивает урожайность зеленой массы растений-фитомелиорантов на засоленной почве. Установлено, что подсев семян растений-фитомелиорантов в старовозрастную дернину оказывает высокий мелиоративный эффект и положительно влияет на рассоление почв. Показано, что одновременное применение растений-фитомелиорантов и консорциума бактерий больше влияет на процесс рассоления почв. Таким образом, совместное применение растений-фитомелиорантов и консорциума бактерий является реальным путем мелиорации деградированных почв, снижения засоленности и будет способствовать повышению урожайности сельскохозяйственных культур на засоленных почвах.

Ключевые слова: растения-фитомелиоранты, консорциум бактерий, азотфиксирующие бактерии, фосфатмобилизирующие бактерии, стимуляция роста, засоленность почв

EFFECT OF PHYTO-MELIORANTS AND A CONSORTIUM OF SALT-TOLERANT BACTERIA ON SOIL SALT REGIME

¹Smirnova I. E. ORCID ID 0000-0001-5854-1529,

¹Baymakhanova G. B. ORCID ID 0000-0001-5416-3209,

²Aldabergenov M. K. ORCID ID 0000-0001-6421-2668,

¹Rakhmetova Ya. U. ORCID ID 0009-0007-8259-7953

¹Limited Liability Partnership “Research and Production Center
of Microbiology and Virology”, Almaty, Republic of Kazakhstan;

²Limited Liability Partnership “Research and Production Center of Agroengineering”,
Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: iesmirnova@mail.ru

Soil salinity is increasing worldwide, negatively impacting crop productivity and posing a serious threat to food security. The aim of this study was to investigate the effect of a consortium of salt-tolerant nitrogen-fixing and phosphate-mobilizing bacteria on the growth of phytomeliorant plants under salt stress conditions and the combined effect of the phytomeliorant plants and the consortium on soil salinity. The following were used as phytomeliorants in the experiments: yellow sweet clover (*Melilotus officinalis* L.), wheat grass (*Agropyron cristatum* L.) and alfalfa (*Medicago sativa* L.). Two strains of salt-tolerant nitrogen-fixing and phosphate-mobilizing bacteria were used. The conducted research showed that the use of a consortium of salt-tolerant bacteria for inoculating the seeds of phytomeliorant plants increases germination, stimulates growth and increases the yield of green mass of plants in saline soil. It has been established that overseeding phytomeliorant plants into old-growth turf has a significant ameliorative effect and positively influences soil desalination. The simultaneous use of phytomeliorant plants and a bacterial consortium to have a greater impact on soil desalination has been shown. Thus, the combined use of phytomeliorants and salt-tolerant bacteria is a real way to improve degraded soils and reduce their salinity and will contribute to increasing the productivity of agricultural crops on saline soils.

Keywords: phytomeliorant plants, bacterial consortium, nitrogen-fixing bacteria, phosphate-mobilizing bacteria, growth stimulation, soil salinity

Введение

Во всем мире отмечается рост засоленных почв, и в настоящее время засолению подвергнуто более 35 % обрабатываемых земель. Причем доля их продолжает расти со средним приростом до 10 % в год, что становится одной из основных проблем при производстве продуктов питания. Прогнозируется, что к 2050 г. 50 % всех пахотных земель будут затронуты засолением [1]. Засоленность отрицательно влияет на продуктивность растений и представляет серьезную угрозу продовольственной безопасности. Отмечено, что засоление происходит в основном на орошаемых засушливых землях, где 20–50 % территории уже считается засоленной [2, с. 6010]. Причем из-за изменения климата темпы засоления ускорятся, так как увеличится площадь земель, нуждающихся в орошении, и повысится объем воды для их орошения.

Производство сельскохозяйственных культур на засоленных почвах сталкивается со многими проблемами. Большинство агрокультур чувствительны к соли и не могут расти на засоленных почвах. Поэтому высокая засоленность почв представляет собой серьезную проблему для производства культур и приводит к снижению их урожайности, а в некоторых случаях и к гибели всего урожая. Изменение структуры почвы, которое происходит под влиянием засоления, крайне трудно восстановить, и во многих случаях оно вызывает необратимую деградацию сельскохозяйственных земель. Засоленные почвы содержат высокие концентрации солей в своих растворах, которые из-за гиперосмотического стресса отрицательно влияют на все аспекты развития растений, включая прорастание, вегетативный рост и репродуктивное развитие. Также солевой стресс вызывает метаболические и физиологические нарушения в самих растениях, что приводит к нарушению деления клеток, подавлению фотосинтеза и дыхания растений, вызывает осмотический стресс и дисбаланс питательных веществ. Показано, что солевой стресс вызывает повреждение растений из-за избыточного накопления в корневой зоне растений растворимых ионов Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} [3]. Все эти процессы снижают доступность воды для растений, концентрацию кислорода в почве, то есть ограничивают приток воды и воздуха к корням растений, что подавляет их развитие растений [4, с. 356]. Поэтому восстановление засоленных земель является крайне актуальной проблемой для повышения продуктивности культур и обеспечения устойчивого развития сельского хозяйства.

Для восстановления засоленных почв используют различные методы рекультивации, такие как физическая мелиорация: вспашка, рыхление, пескоструйная обработка, инверсия профиля; химическая мелиорация – обработка почвы различными реагентами: гипсом, хлоридом кальция, известняком, серной кислотой, серой, сульфатом железа; электромелиорация – обработка почвы электрическим током; биологическая мелиорация [5, с. 3216]. Наиболее перспективным методом является биологическая мелиорация, к которой относится фитомелиорация засоленных земель. Фитомелиорация является более дешевой и эффективной альтернативой восстановления почв по сравнению с физическими и химическими методами. Этот способ основан на снижении засоленности с помощью солеустойчивых растений, способных удалять избыток солей посредством катионного обмена в корневой зоне растений [6]. В ходе этого процесса снижается засоленность почвенного раствора, улучшается стабильность агрегатов почв, ее гидрологические свойства и повышается доступность питательных веществ для растений. Фитомелиорация обеспечивает удаление солей из глубоких слоев почвы и является экологически чистым способом, не оказывающим отрицательного влияния на окружающую среду [7, с. 719]. Также улучшение свойств почв облегчает дальнейшее выращивание несолеустойчивых культур на засоленных землях.

В значительной степени на эффективность фитомелиорации влияет вид растений [8, с. 1438–1448]. Потенциальными видами являются солеустойчивые растения, которые обладают опреснительными свойствами, повышают биологическую активность засоленных почв и улучшают ее структуру. Причем наибольший эффект достигается при использовании аборигенных растений, приспособленных к почвенно-климатическим условиям определенного региона [9, с. 437]. В этой связи актуально применение местных солеустойчивых многолетних трав для фитомелиорации засоленных почв.

Для фиторемедиации почв пастбищ засушливых и полузасушливых регионов Казахстана наиболее перспективными растениями-фитомелиорантами являются амарант, донник, люцерна, сорго, сафлор и др. Эти растения являются аборигенными для Казахстана, приспособленными к его почвенно-климатическим условиям. Они способствуют инфильтрации воды, вымыванию солей, снижают концентрацию ионов солей в почве путем накопления их в своей биомассе [10, с. 14–28]. Кроме этого, они по-

вышают содержание биологического азота почвы, характеризуются высокой питательной ценностью и служат кормом животным [11, с. 2176]. Однако, хотя эти растения являются солеустойчивыми, они подвергаются сильному солевому стрессу и нуждаются в поддержке. Для стимуляции роста и развития растений на засоленных почвах применяют ризосферные микроорганизмы, способные повышать солеустойчивость растений. Эти бактерии колонизируют поверхность корней или находятся в ризосфере растений, выполняют полезные для растений функции и поддерживают растения в условиях солевого стресса [12, с. 1799]. Ризобактерии способны стимулировать рост, увеличивать поглощение питательных веществ и повышать продуктивность культур. Они могут регулировать физиологию растений посредством производства фитогормонов, таких как ауксин, гиббереллины и цитокинины, повышать содержание биологического азота и биодоступность питательных веществ почвы, в частности фосфора [13, с. 1799]. Можно сказать, что ризобактерии способны повышать толерантность растений к засолению и смягчать вызванное солевым стрессом замедление роста. Поэтому применение таких бактерий перспективно.

Цель исследования – изучение влияния консорциума солетолерантных азотфиксирующих и фосфатмобилизующих бактерий на рост и развитие растений-фитомелиорантов в условиях солевого стресса и исследование совместного влияния растений-фитомелиорантов и консорциума бактерий на солевой режим почв.

Материалы и методы исследования

Опыты проводились в лабораторных и полевых условиях. В качестве растений-фитомелиорантов использовали донник желтый (*Melilotus officinalis* L.) сорт Алаула, люцерну (*Medicago sativa* L.) сорт Солеустойчивая и житняк (*Agropyron cristatum* L.). Эти сорта являются солеустойчивыми фитомелиорантами, адаптированными к почвенно-климатическим условиям, и они хорошо растут на засоленных почвах юго-востока Казахстана.

В опытах использовали два штамма бактерий: азотфиксирующий штамм Azp6/2 и фосфатмобилизующий штамм FT4. Бактерии были выделены из ризосферы донника, люцерны и житняка, растущих на сильнозасоленных почвах, изучены и являются солеустойчивыми.

Для изучения влияния бактерий на рост и развитие растений бактерии выращивали на жидких элективных средах: азотфикси-

рующие – на среде Эшби, фосфатмобилизующие – на среде Муромцева. Для создания консорциума суспензии бактерий смешивали в соотношении 1:1, затем суспензией бактерий обрабатывали семена из расчета 5 мл суспензии с титром 1×10^8 клеток на 1 г семян, длительность обработки 2 ч. Контролем служили семена без инокуляции, замоченные в стерильной водопроводной воде. Обработанные семена высевали в сосуды на 250 мл с засоленной почвой (300 г) по 1 г семян на сосуд. Для проведения опытов использовали сильнозасоленную почву с суммой солей водной вытяжки 3,62 %, значение pH 8,2. Длительность опыта составляла 30 суток, затем растения убирали, измеряли длину корней и стеблей, массу растений высушивали, доводили до постоянного веса и взвешивали. Эксперименты проводили в климатической камере (Memmert HPP 750 Constant Climate Chamber, Германия) со следующими параметрами: световой день – 9 ч, температура 25 °С, освещенность: холодный белый свет – 6500 К, теплый свет 2700 К; ночной режим – 15 ч; температура 21 °С, влажность – 65 %. Исследования проводили в трехкратной повторности.

Постановку полевых опытов проводили на юго-востоке Казахстана в Алматинской области в окрестностях пос. Ақший на деградированных засоленных пастбищах, координаты: 43°59'31" с. ш., 76°19'25" в. д., 507 м над уровнем моря. Площадь экспериментального участка составляла 0,5 га. Почва пастбища по типу отнесена к сероземам обыкновенным с сильным засолением, сумма солей водной вытяжки составляла 3,62 %, pH 8,2. Сбор проб почв проводили в соответствии с ГОСТ [14]. Для полевого эксперимента забор почв проводился в 25 точках. Среднюю пробу составляли из пяти точечных проб. Пробы почв отбирали осенью после укоса трав в 2023–2025 гг. Глубина забора почв составляла 0–30, 30–60 и 60–90 см. Отобранные образцы плотно упаковывали в полиэтиленовые пакеты и транспортировали в лабораторию. Анализ водной вытяжки и изучение минерального состава почв проводили в аккредитованной испытательной лаборатории ТОО «КазНИИ почвоведения и агрохимии им. У. У. Успанова» (г. Алматы, Казахстан). Весной 2023 г. был проведен подсев смеси семян донника, люцерны и житняка. Травы подсевали методом прямого посева в старовозрастную дернину. Перед посевом семена инокулировали бактериями из расчета 200 мл суспензии бактерий на гектарную норму семян: норма посева донника составляла 10–12 кг/га, люцерны – 16–20 кг/га, житняка – 8–10 кг/га.

Статистическую значимость полученных результатов анализировали с использованием пакета программ STATISTICA 10.0, ver. 6.0 [15]. Различия считались значимыми при $p < 0,05$, а значения представлены как среднее значение (M) ± стандартное отклонение (±SEM).

Результаты исследования и их обсуждение

Для применения бактерий в сельском хозяйстве важным показателем является их способность стимулировать рост растений на засоленных почвах. В этой связи провели изучение влияния солетолерантных бактерий на рост растений-фитомелиорантов донника, люцерны и житняка. Опыты проводили на засоленной почве, сумма солей водной вытяжки 3,62 %, рН 8,2. В опытах использовали консорциум из двух штаммов бактерий: азотфиксирующий штамм Azp6/2 и фосфатмобилизующий штамм FT4. Ранее было установлено, что эти штаммы обладали высокой солеустойчивостью, способностью активно фиксировать азот и повышать биодоступность фосфора при высоком солевом стрессе. Перед посевом семена растений инокулировали консорциумом бактерий. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Из данных табл. 1 следует, что инокуляция семян консорциумом бактерий повышала их всхожесть, стимулировала рост и накопление зеленой массы растений при их выращивании на засоленной почве. Так, предпосевная обработка семян увеличила всхожесть донника до 69 % (контроль 38 %), житняка – до 75,2 % (контроль 65 %), люцерны – до 85 % (контроль 70 %). Также

установлено, что длина стеблей растений увеличилась более чем в 2,0 раза, длина корня – в 2,0–2,6 раз, сухая масса растения – в 2,3–2,6 раза, урожайность зеленой массы на сосуд увеличилась на 30–32 % по сравнению с контролем без инокуляции. Увеличение длины корней более чем вдвое свидетельствует об адаптации растений к засолению почвы. Можно сказать, что консорциум бактерий обладает большим потенциалом для поддержания роста растений-фитомелиорантов и повышения их выживания в стрессовых условиях на засоленных почвах.

Для мелиорации засоленных почв, повышения продуктивности и улучшения состояния травостоев пастбищ был проведен подсев растений-фитомелиорантов донника, люцерны и житняка в старовозрастную дернину. Проведенный анализ почвы пастбища показал, что степень засоленности почв была высокая, почва характеризовалась высокой щелочностью и низким плодородием. Все эти показатели неблагоприятны для роста и развития большинства пастбищных растений. Через два года (2025 г.) после постановки опыта (2023 г.) отмечено существенное изменение содержания водорастворимых солей в верхних горизонтах почвы пастбища. Данные по содержанию водорастворимых солей в почве пастбища приведены в табл. 2.

Из данных табл. 2 следует, что сумма солей водной вытяжки была очень высокой и составляла 3,62 %. Установлено, что при одновременном применении растений-фитомелиорантов и консорциума бактерий общая засоленность почвенного раствора в верхнем горизонте почвы (0–30 см) существенно снижалась.

Таблица 1

Влияние консорциума бактерий на рост и развитие культур на засоленной почве

Варианты опыта	Всхожесть, %	Длина стебля, см	Длина корня, см	Сухая масса растения, г	Урожайность зеленой массы, г/сосуд
Донник					
Контроль	38,1±1,0	10,6±0,1	11,3±0,1	0,5±0,01	9,7±0,1
Консорциум	69,2±1,2	23,2±0,2	24,2±0,2	1,3±0,02	12,6±0,1
Люцерна					
Контроль	70,1±1,3	10,6±0,1	11,6±0,1	0,8±0,02	15,8±0,1
Консорциум	85,3±1,4	23,9±0,2	29,9±0,2	1,9±0,02	20,9±0,3
Житняк					
Контроль	65,2±1,1	6,4±0,1	7,2±0,1	0,7±0,01	12,8±0,1
Консорциум	75,1±1,2	12,8±0,2	14,5±0,1	1,6±0,02	16,9±0,2
Уровень доверительной вероятности $p < 0,05$; $n = 3$					

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Содержание водорастворимых солей в почве засоленного пастбища

Варианты опыта	Глубина, см	Сумма солей, %	Щелочность, общая в HCO_3^- , мг/экв	Ионы, мг/экв					
				Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
Октябрь 2023 г.									
Контроль	0–30	3,62	0,42	6,45	57,3	21,4	1,3	14,14	4,36
	30–60	5,67	0,63	8,32	60,4	24,8	2,3	35,81	5,56
	60–90	7,36	0,82	8,65	65,8	29,3	3,7	40,22	4,93
Октябрь 2025 г.									
Контроль	0–30	3,55	0,44	5,45	58,2	20,8	1,2	14,57	4,21
	30–60	5,86	0,53	8,65	62,2	25,9	3,4	36,73	5,12
	60–90	7,82	0,72	9,05	66,7	30,6	4,2	42,24	4,08
Фитомелиоранты	0–30	2,33	0,31	0,18	21,3	2,46	0,3	16,67	0,52
	30–60	5,36	0,49	8,60	60,1	23,2	2,3	34,55	4,52
	60–90	6,93	0,70	8,55	64,5	29,7	4,5	40,08	4,14
Фитомелиоранты + консорциум	0–30	1,476	0,22	0,14	18,03	2,24	0,19	16,66	0,43
	30–60	5,23	0,51	8,62	58,2	23,9	2,1	33,17	4,46
	60–90	7,09	0,71	8,9	60,2	27,5	4,1	39,82	3,87

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Так, если в начале опыта сумма солей составляла 3,62 %, через 2 года она снизилась на 2,144 % и составила 1,476 %. Изучение солевого обмена почвы показало, что в формировании солевого режима верхних горизонтов почвы участвуют анионы Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , и катионы Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} . По присутствию и количеству водорастворимых солей в профиле почвы определен хлоридный тип засоления высокой степени, содержание ионов Na^+ составляло 14,14–16,66 мг/экв, что свидетельствует об осолонцевании. Изучение влияния растений-фитомелиорантов и консорциума бактерий на солевой обмен почвы показало существенное снижение содержания токсичных для растений ионов Cl^- и SO_4^{2-} в верхних горизонтах почвы. Известно, что хлоридное засоление особенно сильно действует на растения, несколько меньшая токсичность отмечается у сульфатного засоления. Показано, что под влиянием растений-фитомелиорантов и консорциума бактерий происходит снижение в верхних горизонтах почвы общей суммы солей и токсичных для растений ионов Cl^- и SO_4^{2-} , то есть отмечается процесс рассоления почв пастбищ. Это очень важно, так как именно эта глубина 0–30 см охватывает корневую зону большинства с/х культур и трав. Достоверного изменения засоленности почв при применении фитомелиорантов, фитомелиорантов и консорциума бактерий в более глубоких слоях почвы 30–60 см и 60–90 см авторами не выявлено.

лиорантов и консорциума бактерий в более глубоких слоях почвы 30–60 см и 60–90 см авторами не выявлено.

Заключение

В результате проведенных исследований авторами показано, что применение консорциума солетолерантных бактерий для инокуляции семян растений-фитомелиорантов повышает их всхожесть до 70–75 % и урожайность зеленой массы растений на 30–32 % на засоленной почве. Это свидетельствует о том, что азотфиксирующие и фосфатмобилизующие бактерии, входящие в состав консорциума, помогают растениям-фитомелиорантам более активно противостоять абиотическим стрессам, таким как засоленность, и стимулируют их рост и развитие. Видимо, это связано с тем, что азотфиксирующие бактерии снабжают растения дополнительным биологическим азотом за счет фиксации азота атмосферы, а фосфатмобилизующие бактерии, входящие в состав консорциума, переводят плохо растворимые фосфаты почвы в растворимые формы и повышают их биодоступность для растений. Также в исследовании авторов впервые показано, что одновременное применение растений-фитомелиорантов и консорциума солеустойчивых бактерий является весьма эффективным мелиоративным приемом в снижении засоленности

и активно влияет на процесс рассоления верхних горизонтов почвы. Этот процесс, возможно, связан с выносом подвижных солей с зеленой массой растений-фитомелиорантов при укосе пастбищ.

Таким образом, установлено что применение консорциума солеустойчивых азотфиксирующих и фосфатмобилизирующих бактерий повышает устойчивость растений-фитомелиорантов к солевому стрессу, о чем свидетельствует стимуляция их роста и повышение урожайности в условиях засоления. Также показано, что совместное использование растений-фитомелиорантов и консорциума солетолерантных бактерий является реальным путем снижения засоленности почв. Можно сказать, что разработанные мероприятия имеют большой потенциал для поддержания роста растений на засоленных почвах и являются реальным путем мелиорации деградированных почв, снижения засоленности и повышения урожайности сельскохозяйственных культур на засоленных почвах.

Список литературы

1. Tarolli P., Luo J., Park E., Barcaccia G., Masin R. Soil salinization in agriculture: Mitigation and adaptation strategies combining nature-based solutions and bioengineering // *iScience*. 2024. Vol. 27. Is. 2. P. 108830. DOI: 10.1016/j.isci.2024.108830.
2. Wuyun D., Bao J., Crusiol L. G. T., Wulan T. Generating salt-affected irrigated cropland map in an Arid and Semi-Arid region using multi-sensor remote sensing data // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. 23. P. 6010. DOI: 10.3390/rs14236010.
3. Atta K., Mondal S., Gorai S., Singh A. P., Kumari A., Ghosh T., Roy A., Hembram S. Impacts of salinity stress on crop plants: improving salt tolerance through genetic and molecular dissection // *Front. Plant Sci.* 2023. Vol. 14. P. e1241736. DOI: 10.3389/fpls.2023.1241736.
4. Abebe H., Tu Y. Impact of salt and alkali stress on forage biomass yield, nutritive value, and animal growth performance: A Comprehensive Review // *Grasses*. 2024. Vol. 3. Is. 4. P. 355–368. DOI: 10.3390/grasses3040026.
5. An C., Han F., Li N., Zheng J., Li M., Liu Y., Liu H. Improving physical and chemical properties of saline soils with fly ash saline and alkaline amendment materials // *Sustainability*. 2024. Vol. 16. Is. 8. P. 3216. DOI: 10.3390/su16083216.
6. Nainwal R. C., Chaurasiya P., Kumar A., Singh M., Singh D., Tewari S. K. Phytoremediation: A sustainable approach to combat soil salinity // *Adv. Environ. Eng. Res.* 2024. Vol. 5. Is. 2. P. e2402015. DOI: 10.21926/aeer.2402015.
7. Fu W., Yu J., Hu Q., Wang H., Zhao Y. Soil salt and water regulation in saline agriculture based on physical measures with model analysis // *Water*. 2024. Vol. 16. Is. 5. P. 719. DOI: 10.3390/w16050719.
8. Gairola S. U., Bahuguna R., Bhatt S. S. Native plant species: a tool for restoration of mined lands // *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2023. Vol. 23. Is. 2. P. 1438–1448. DOI: 10.1007/s42729-023-01181-y.
9. Vlasenko M. V., Rybashlykova L. P., Turko S. Y. Restoration of degraded lands in the Arid zone of the European part of Russia by the method of phytomelioration // *Agriculture*. 2022. Vol. 12. Is. 3. P. 437. DOI: 10.3390/agriculture12030437.
10. Досжанова А. С., Оспанбаев Ж., Сембаева А. С., Майбасова А. С., Ибаш Н. Д., Жексембі Б. Агробиологические приемы восстановления плодородия деградированных орошаемых земель юго-востока Казахстана // *Почвоведение и агрохимия*. 2023 Т. 2. С. 14–28. DOI: 10.51886/1999-740X_2023_2_14.
11. Tucak M., Ravlic M., Horvat D., Cupic T. Improvement of forage nutritive quality of Alfalfa and Red Clover through plant breeding // *Agronomy*. 2021. Vol. 11. Is. 11. P. 2176. DOI: 10.3390/agronomy11112176.
12. Li Ch. Y., He R., Tian Ch. Y., Song J. Utilization of halophytes in saline agriculture and restoration of contaminated salinized soils from genes to ecosystem: Suaeda salsa as an example // *Marine Pollution Bulletin*. 2023. Vol. 197. P. e115728. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115728.
13. Maciel-Rodriguez M., Moreno-Valencia F. D., Plascencia-Espinosa M. The role of plant growth-promoting bacteria in soil restoration: A strategy to promote agricultural sustainability // *Microorganisms*. 2025. Vol. 13. Is. 8. P. 1799. DOI: 10.3390/microorganisms13081799.
14. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора проб и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Стандартинформ, 2017. 10 с.
15. Боровиков В. П. Популярное введение в современный анализ данных и машинное обучение на STATISTICA. М.: Горячая линия – Телеком, 2024. 354 с. ISBN 978-5-9912-0738-6.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.