ГРНТИ: 68.33.31; 68.05.29; 68.05.43

DOI: 10.51886/1999-740X_2026_4_46

А.Х. Наушабаев[1], С.С. Наушабаева[1], Н. Сейткали[1], Т.К. Василина[1], К.О. Караева[1]*, Н.П. Аубакиров[1]

ТРАНСФОРМАЦИЯ ИОННОГО КОМПЛЕКСА ДЕГРАДИРОВАННЫХ СОЛОНЦОВ ПАШНИ СЕМИАРИДНОЙ ЗОНЫ АКМОЛИНСКОЙ ОБЛАСТИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СЕРНЫХ МЕЛИОРАНТОВ: ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

[1]Казахский национальный аграрный исследовательский университет,

*050010, Алматы, пр. Абая, 8, Казахстан, *e-mail: askhat.naushabayev@kaznaru.edu.kz*

*Аннотация***.** Мелкие солонцы семиаридной зоны Акмолинской области характеризуются повышенным содержанием обменного магния и натрия, сильнощелочной реакцией среды и структурной неустойчивостью. Несмотря на это они активно вовлекаются в неорошаемую пашню и подвержены антропогенной деградации. Для разработки стратегии их восстановления были проведены модельные лабораторные исследования, целью которых была оценка краткосрочного воздействия шести серных и серосодержащих мелиорантов на химические свойства мелких солонцов. Внесение серосодержащих мелиорантов в мелкие солонцы инициировало комплекс взаимосвязанных физико-химических процессов, затрагивающих как состав почвенного раствора, так и состояние почвенного поглощающего комплекса. Изменения носили системный характер, что подтверждается как однофакторным анализом, так и результатами PCA и корреляционного анализа. Наиболее чувствительным показателем оказалась реакция почвы, которая во всех вариантах сместилась в сторону снижения. При этом степень подкисления различалась между вариантами опыта. Среди мелиорантов применение жидкой серы способствовало максимальному снижению pH от 8,73 до 7,75 в сравнении с контрольным вариантом. Наиболее удаленными от контрольного варианта явились варианты с жидкой серой и серной кислотой, которые демонстрировали максимальные сдвиги как по растворимым ионам, так и по показателям обменного комплекса. Эти мелиоранты в течении 30-дневной инкубации воздействовали не на отдельные параметры, а на всю химическую систему мелких солонцов. По данным многомерного анализа (PCA) установлено, что в зависимости от интенсивности влияния серосодержащих мелиорантов на мелкие солонцы, они образуют отдельные кластеры. Корреляционный анализ выявил выраженные антагонистические связи между долей обменного натрия и кальция, подтверждая ключевую роль процессов Ca–Na-обмена в трансформации солонцовой почвы. Таким образом, результаты исследований позволили выявить наиболее эффективные серосодержащие мелиоранты, которые за короткий срок изменили химический состав почвенного раствора и поглощающего комплекса мелких солонцов.

Ключевые слова: автоморфные мелкие солонцы, семиаридная зона, Акмолинская область, деградация, мелиорация, серные и серосодержащие мелиоранты.

ВВЕДЕНИЕ

В силу своих физико-географических особенностей более 80% засоленных почв СНГ сосредоточено на территории Республики Казахстан. Их площадь составляет 111,5 млн. га или 41% территории республики [1]. Если в южных, юго-западных и юго-восточных районах республики преобладают солончаки и солончаковые почвы, то в северных и центральных районах - солонцы и солонцеватые почвы (74,077 млн. га) [2]. Последние сформировались в виде пятнистых комплексов среди наиболее плодородных черноземов и каштановых почв зернового пояса северных областей (Акмолинская, Павлодарская, Костанайская) Республики. Эти почвы обладают неблагоприятными химическими и водно-физическими свойствами, связанными с повышенным содержанием поглощенного нат-

рия и магния, а также токсичным содержанием натриевых соединений в растворе [3]. Среди последних часто встречаются гидрокарбонаты и карбонаты натрия, которые являются самыми вредными для растений. Их токсичность в 3 и 10 раза выше чем у токсичного сернокислого натрия. Токсичная сода, поступая в растительный организм, отравляет его, нарушает нормальное течение физиологических процессов, снижает энергию фотосинтеза и, следовательно, продуктивность растений [4]. В подзоне темно-каштановых почв на мелких и средних участках сильнощелочных смешанно содово-хлоридно-сульфатных мелких магниево-глубоко натриевых солонцах проводятся все виды агротехники, от вспашки до уборки урожая. То есть затрачиваются значительные материальные, денежные и трудовые ресурсы, которые не окупаются из-за низкого урожая.

В последнее время в результате трансформации сельскохозяйственных угодий происходит качественное изменение состава пашни. Поскольку более 83.9% пахотных земель республики размещено в лесостепной, степной и сухостепной зонах, здесь активно осуществляется освоение новых участков залежной пашни и пастбищ с солонцовыми почвами. Указанные действия привели к тому, что на самых плодородных южных черноземах и каштановых почвах пашни и особенно на вовлеченных в сельскохозяйственный оборот средних, мелких и корковых солонцах пастбищ зернового пояса образовались крупные вертикальные трещины шириной >3см. Из-за чего постепенно снизилась урожайность зерновых культур [5, 6]. Причина этого явления заключается в том, что с момента освоения целины (1954-1960 гг.) на равнинных самых плодородных черноземах и каштановых почвах активно развивалась ветровая и водная эрозия, которая продолжается по сегодняшней день [7]. Это привело к постепенному уменьшению мощности гумусового горизонта на них и особенно на вновь освоенных пастбищных маломощных солонцах, что в конечном счете стало причиной механической инверсии верхних горизонтов А и B_1 [8]. При ежегодной вспашке плуг постепенно захватывает часть солонцового горизонта B_1, который вовлекался в пахотный горизонт и активно перемешивался. Особенно пострадали и подверглись деградации вновь освоенные под пашню солонцы и солонцеватые почвы пастбищ, которые имеют маломощный гумусовый горизонт. Несмотря на то, что, солонцы считаются засоленными, они являются неразрывной частью геодермы и большим резервом кормового животноводства. Под влиянием длительной распашки сильно нарушается естественное строение солонцов, а часто и весь комплекс их физических, механических и физико-химических свойств [9].

На сегодняшний день фосфогипс остается единственным традиционным мелиорантом, используемым для улучшения солонцов и солонцеватых почв зернового пояса Казахстана. Его малая эффективность в щелочной среде почвы и экологическая небезопасность (отход производства фосфорных удобрений) известна давно. В США 25 лет тому назад отказались ее использовать. Именно поэтому необходимость поиска высокоэффективных экологически безопасных мелиорантов и разработка передовых технологий для природно-климатических и производственных условий зернового пояса нашей Республики показывает актуальность этой работы не только в Казахстане, но и на международном уровне. В этой связи целью наших исследований явилось определение мелиоративной эффективности серных и серосодержащих мелиорантов на деградированных мелких солонцах Акмолинской области для разработки стратегии их улучшения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Место полевого сбора почвенных образцов. Сбор почвенных образцов произведен на территории зерносеющего хозяйства в Коргалжинском районе Акмолинской области, которая занимается выращиванием зерновых культур. На территории хозяйства получили распространение темно-каштановые солонцеватые почвы с солонцами степными, выделяющиеся отдельными контурами. Образцы отобраны из опорного разреза, который заложен осенью (30.10.2025г). Координаты разреза N 50° 28'22,4", E070°46'23,4". Абсолютная высота точки исследования - 380 м. Разрез заложен на вспаханном сильнопятнистом участке поля №4 на неорошаемой пашне, где после уборки пшеницы и вспашки осталась стерня.

Методика лабораторного эксперимента. Для определения сравнительной мелиоративной эффективности серных и серосодержащих мелиорантов на мелких солонцах зерносеющего региона Акмолинской области нами проведен модельный эксперимент в условиях тепличной камеры. Последнее обеспечило поддержание оптимальной температуры воздуха и почвы на уровне 23-25°С. В течение эксперимента постоянная влажность изучаемых почв в стаканах (с учетом исходной гигроскопической влажности) в пределах оптимума (21% или 70% от НВ) поддерживалась ежедневным взвешиванием и поливом дистиллированной водой по мере необходимости. Для эксперимента использованы прозрачные мерные стаканы объемом 275 мл. Образцы почв для эксперимента отбирались из солонцового горизонта B_1 мелкого солонца поля №4 из глубины 7-45 см [10]. Взятые образцы высушивались до воздушно-сухого состояния и после тщательного их перемешивания, подготовленный средний образец пропускала через сито отверстием 2,0 мм. До начала опыта в этих образцах определялось ее исходное состояние, что позволило рассчитать количество серных и серосодержащих мелиорантов: элементарная сера 13,12 т/га (99,9% S), наносера 14,82 т/га (80% S + 20% Ca), серосодержащая пульпа 15,99 т/га (86% S+13,057% зола), жидкая сера 43,89 т/га (22,8% S + 15,2N + адьюванты), раствор (1%) серной кислоты 19,68 т/га и фосфогипс 40,54 т/га.

Для расчета принята величина плотности солонцового горизонта на уровне 1,50 г/см^3. Поскольку изучаемые почвы являются смешанно содово–хлоридно-сульфатными магнезиальными мелкими солонцами, то расчет необходимого количества гипса, элементарной серы и серной кислоты проводился по усовершенствованной формуле Б.М. Агаева [11]. По истечению 30 дневной инкубации серных и серосодержащих мелиорантов определили: pH - ГОСТ-26423-85, ионный состав водной вытяжки – ГОСТ 26423-85; 26428-85, поглощенные основания - ГОСТ 26487-85; 26950-86) [12, 13].

Статистический анализ. Модельный эксперимент проведен по схеме полностью рандомизированного однофакторного опыта (one-way ANOVA): фактором служил вариант внесения мелиоранта (7 уровней, включая контроль), для каждого варианта использовали три независимые повторности (n=3). Помимо F критерия и *p*-значений оценивали практическую величину эффекта: для классической ANOVA рассчитывали показатель размера эффекта (ω^2) и 95% доверительные интервалы для разницы «вариант – контроль». Для интегральной оценки изменений комплекса свойств почвы дополнительно проводили анализ главных компонент (PCA) по стандартизированным данным; результаты представляли на диаграмме рассеяния по первым двум компонентам с указанием вклада объяснённой дисперсии [14-18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В подзоне темно-каштановых почв Коргалжинского района автоморфные мелкие солонцы образуют комплексы с незасоленными почвами. Они в настоящее время активно вовлечены в неорошаемую пашню. Эти почвы обладают низким уровнем плодородия. Об этом свидетельствуют данные параметров почв контрольного варианта. Так, например, в почвенных образцах содержание HCO_3^- и CO_3^{2-} ионов было очень высоким (0.88 и 0.24 мг-экв). Высокое содержание данных солей обусловило повышенную щёлочность среды (pH 8,73), что оказывает негативное влияние на рост и развитие большинства растений (таблица 1).

Однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) показал, что внесение серных и серосодержащих мелиорантов оказывают статистически значимое влияние на параметры солонцового горизонта мелких солонцов. В частности, для концентрации практически всех ионов водной вытяжки, электропроводности и ее pH выявлены значительные различия между вариантами (p<0.001).

Таблица 1 – Влияние 30-дневной инкубации серных и серосодержащих мелиорантов на параметры раствора автоморфных мелких солонцов, среднее n=3

Варианты	HCO_3^-	CO_3^{2-}	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
Контроль	0.88 ± 0.01	0.24 ± 0.01	1.31 ± 0.01	2.13 ± 0.01	0.27 ± 0.01	0.91 ± 0.01	3.12 ± 0.01	0.01 ± 0.00
Tes1	0.71 ± 0.12	0.05 ± 0.09	1.20 ± 0.07	2.18 ± 0.08	0.71 ± 0.10	0.71 ± 0.14	2.65 ± 0.05	0.02 ± 0.00
Tns2	0.55 ± 0.05	0.00 ± 0.00	1.34 ± 0.34	3.50 ± 0.39	1.45 ± 0.19	0.90 ± 0.20	3.01 ± 0.42	0.02 ± 0.00
Tsp3	0.75 ± 0.02	0.07 ± 0.02	1.50 ± 0.08	2.51 ± 0.51	0.55 ± 0.16	0.96 ± 0.10	3.23 ± 0.46	0.02 ± 0.00
Tsl4	1.00 ± 0.04	0.00 ± 0.00	12.93 ± 0.46	0.35 ± 0.30	4.99 ± 0.24	4.77 ± 0.20	4.08 ± 0.37	0.43 ± 0.02
Tsa5	0.47 ± 0.06	0.00 ± 0.00	1.31 ± 0.36	6.98 ± 0.29	3.18 ± 0.14	1.52 ± 0.14	4.05 ± 0.71	0.02 ± 0.00
Tph6	0.35 ± 0.02	0.00 ± 0.00	8.54 ± 0.75	0.47 ± 0.57	2.78 ± 0.56	1.55 ± 0.20	3.95 ± 0.47	1.08 ± 0.37
F – крит.	47,721	17,707	462,653	115,136	135,085	255,203	5,612	24,906
P - value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.0038	<0.001

Все испытанные серосодержащие мелиоранты вызвали снижение показателя pH по сравнению с контрольным вариантом, что подтверждается отрицательными значениями разности средних (вариант – контроль). Однако степень выраженности и статистическая устойчивость этого эффекта различались между вариантами. Наиболее значительное снижение pH отмечено на варианте с жидкой серой (Tsl4), где в отношении контроля она опустилась до 7,75 (таблица 2). Доверительный интервал был относительно узким и не пересекал нулевую отметку, а повторности демонстрировали высокую согласованность, что свидетельствует о статистически устойчивом достоверном эффекте данного мелиоранта (рисунок 1).

Выраженное снижение pH свидетельствует о высокой кислотогенерирующей активности жидкой серы в течение 30-дневного периода инкубации. Подкисление солонцовой почвы способствует увеличению подвижности кальция и магния, а также ослаблению закрепления натрия в обменных позициях почвенного поглощающего комплекса. Подкисление почвенной среды является одним из ключевых факторов, обеспечивающих замещение обменного натрия кальцием. По мере снижения щёлочности возрастает растворимость кальцийсодержащих минералов и концентрация ионов Ca^{2+} в почвенном растворе, что способствует более эффективному вытеснению Na^{+} из обменного комплекса почвы. Корреляционный анализ выявил выраженные отрицательные связи между долей обменного натрия и долей обменного кальция, что отражает антагонистический характер их распределения в катионном комплексе. Варианты с фосфогипсом (Tph6), серной кислотой (Tsa5) и жидкой наносерой (Tns2) также характеризовались устойчивым снижением pH до 8.27, 8.35 и 8.41, разница которого в отношении контроля (pH 8,73) находилась в пределах около 0,3–0,5 единиц. Доверительные интервалы для этих вариантов располагались полностью в отрицательной области, что свидетельствует о статистически подтверждённом подкисляющем эффекте. Если на варианте с фосфогипсом внутривариантная вариабельность по значению pH была минимальной, то на остальных двоих (Tsa5 и Tns2) вариабельность между повторностями была умеренной и несколько широкой. Масштаб изменения указывает на умеренную, но стабильную трансформацию кислотно-щелочного состояния почвы.

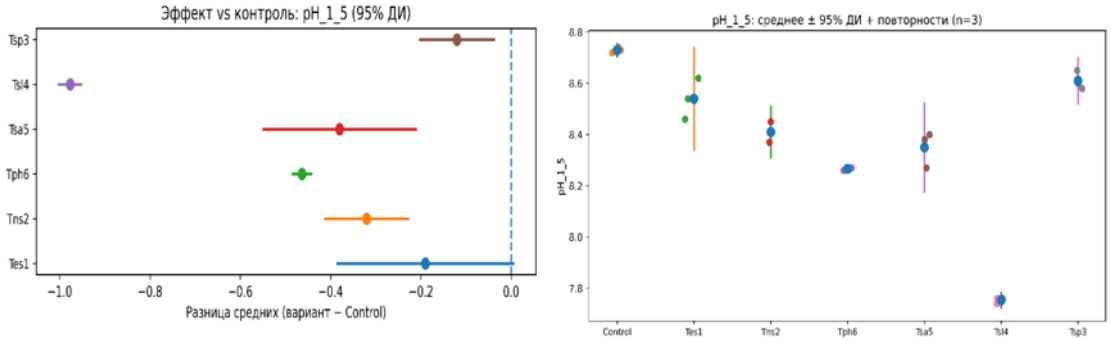


Рисунок 1 - Изменение реакции почвенного раствора ($pH_{1:5}$) под действием мелиорантов (А) и по вариантам опыта (Б)

На варианте с элементарной серой (Tes1) снижение pH было менее выраженным (порядка 0,2 единицы), а доверительный интервал приближался к нулевой линии или частично её перекрывал, что указывает на ограниченную статистическую устойчивость различий реакции среды. Несмотря на совпадение направления эффекта с другими вариантами, интенсивность изменения оказалась минимальной. Вариант с серной пульпой (Tsp3) демонстрировал относительно небольшое уменьшение pH (около 0,15 единицы), однако доверительный интервал не пересекал нулевую отметку, что позволяет рассматривать данный эффект как статистически подтверждённый, хотя и умеренный по величине. Таким образом, наиболее выраженный мелиоративный эффект показала жидкая сера (Tsl4), тогда как остальные мелиоранты продемонстрировали умеренное или слабое подкисление.

В составе поглощенных оснований солонцового горизонта зафиксировано сравнительно высокое содержание магния (47.20% от СЕС), чем натрия (8.40% от СЕС), что говорит об их магнезиальности. Первое испытание серных и серосодержащих мелиорантов в сравнении с контрольным вариантом показало их эффективность. После 30 дневной инкубации их эквивалентных доз, ионный состав почвенного раствора и состав поглощенных оснований мелких солонцов претерпели весьма заметные изменения. Если в начале опыта до внесения мелиорантов доля обменного натрия составила 8,40% от суммы, то после инкубации серных мелиорантов она в среднем снизилась до 7.90, 7.80 и 7,50% от емкости катионного обмена на вариантах с жидкой наносерой (Tns2, Tsl4) и серной кислотой (Tsa5), т.е. обеспечилось рассолонцевание почвы (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние 30-дневной инкубации серных и серосодержащих мелиорантов на параметры плодородия автоморфных мелких солонцов, среднее n=3

Варианты	EC, dS/m	pH	Обменные катионы, % от CEC				CEC, мг-экв на 100г почвы	AEE
			Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}		
Контроль	0.93 ± 0.00	8.73 ± 0.01	44.20 ± 0.00	47.23 ± 0.06	8.37 ± 0.06	0.20 ± 0.00	31.19 ± 0.03	0,000
Tes1	0.86 ± 0.01	8.54 ± 0.08	51.60 ± 4.50	38.47 ± 3.84	9.47 ± 1.17	0.47 ± 0.06	30.78 ± 1.34	0,335
Tns2	1.12 ± 0.03	8.41 ± 0.04	54.47 ± 1.25	37.13 ± 0.96	7.90 ± 0.35	0.40 ± 0.00	31.96 ± 1.00	0,046
Tsp3	1.00 ± 0.03	8.61 ± 0.04	51.97 ± 2.98	37.67 ± 3.78	9.90 ± 0.78	0.50 ± 0.00	28.43 ± 2.69	0,757
Tsl4	2.52 ± 0.04	7.75 ± 0.01	58.27 ± 3.37	33.20 ± 6.75	7.90 ± 4.10	0.67 ± 0.15	27.50 ± 1.29	-0,005
Tsa5	1.83 ± 0.04	8.35 ± 0.07	59.73 ± 2.66	32.37 ± 2.46	7.47 ± 0.25	0.40 ± 0.00	32.84 ± 1.12	0,003
Tph6	1.73 ± 0.09	8.27 ± 0.01	46.73 ± 2.93	39.83 ± 1.89	10.30 ± 0.70	3.17 ± 5.48	29.91 ± 2.52	-2,142
F – крит.	62,32	147,183	11,688	5,935	1,343	0,755	3,932	-
P - value	<0.001	<0.001	<0.001	0.0029	0.3027	0.6162	0.0163	-

AEE - агроэкономическая эффективность, интегральный показатель, отражающий отношение суммарного нормированного эффекта изменения химических показателей почвы относительно контрольного варианта к затратам на приобретение мелиоранта.

В поглощающем комплексе за счет эффекта серных мелиорантов повышается доля поглощенного кальция по сравнению с контрольным вариантом. Больше всего кальция поступило в поглощающий комплекс почв вариантов с жидкой серой (Tsl4) и серной кислотой (Tsa5), где ее доля составила соответственно 58.10 и 59.80% от СЕС. В этих же вариантах установлено снижение доли поглощенного магния до 33.40 и 32.30%, которая в почве контрольного варианта была высокой (47.20%). Однако, в почвенном растворе варианта с жидкой серой (Tsl4) образовалась несколько повышенная концентрация HCO_3^- (1,00 мг-экв), а на варианте с серной кислотой (Tsa5) самая низкая (0,47 мг-экв) в отношении контрольного варианта (0,88 мг-экв). Несмотря на относительно в почвах отмеченных вариантов существенно повышается содержание хлор и сульфат ионов, которые составили соответственно 12.93 и 6.98 мг-экв

на 100 г почвы (таблица 3). На вытеснение обменного натрия из поглощающего комплекса в раствор на вариантах с жидкой серой (Tsl4) и серной кислотой (Tsa5) указывает ее содержание в водной вытяжке, которое после мелиорации стало самым высоким среди мелиорантов (4.08 и 4.05 мг-экв). Кроме того, на вариантах с серной кислотой (Tsa5) и фосфогипсом (Tph6) по сравнению с контрольным вариантом заметно повышается содержание кальция и магния в почвенном растворе, особенно на варианте с жидкой серой (Tsl4, 4,99 и 4,77 мг-экв). Емкость катионного обмена изменяется менее существенно.

Биохимическое окисление природных соединений серы осуществляется сероокисляющими автотрофными микроорганизмами рода *Thiobacillus* [19]. Тионовые бактерии - хемолитоавтотрофы, использующие энергию окисления серы кислородом для процессов хемосинтеза. Ее отдельные виды (*T. Thiporus, T. ferrooxidans* и *T. Neopolitanus* и др.), развивающиеся преимущественно в щелочных и слабокислых условиях наиболее интенсивно окисляют элементарную серу до оксидных форм, которые соединяясь с водой образуют серную кислоту: $S \rightarrow SO_3^{2-} \rightarrow SO_4^{2-} + H_2O \rightarrow H_2SO_4$. Образовавшаяся серная кислота инициирует мобилизацию кальция из карбонатов. Это приводит к замещению натрия в почвенном поглощающем комплексе и снижению щелочности.

С точки зрения агроэкономической эффективности (АЕЕ) высокую эффективность в отношении контроля показали варианты с элементарной серой (Tes1) и серной пульпой (Tsp3). Значения АЕЕ в отмеченных вариантах составили 0,335 и 0,757 (таблица 2). На среднем уровне оказались варианты с жидкой наносерой (Tns2) и серной кислотой (Tsa5). Отрицательными значениями АЕЕ отличились варианты с жидкой серой (Tsl4) и фосфогипсом (Tph6). Это свидетельствуют о том, что несмотря на положительный эффект жидкой серы на химический состав солонцов, ее закупочная цена не делает ее экономический рентабельной (-0,005).

Анализ главных компонент (PCA), выполненный на основе показателей почвы, позволил выявить интегральные различия между вариантами опыта (рисунок 2). Первая главная компонента (PC1) объясняла 36,9%, а вторая компонента (PC2) - 21,3% общей дисперсии данных. Совокупно первые два компонента описывали 58,2% вариабельности, что указывает на удовлетворительную репрезентативность двумерной проекции. Контрольный вариант сформировал отдельный кластер в правой части графика (положительные значения PC1), что свидетельствует о его отчетливом отличии от большинства обработанных вариантов по совокупности почвенных показателей. Варианты с жидкой серой (Tsl4) и частично серной кислотой (Tsa5) смещались в левую область по оси PC1, демонстрируя значительное отклонение от контрольного варианта. Особенно выраженная дифференциация наблюдалась для жидкой серы (Tsl4), точки которой формировали компактную группу в зоне отрицательных значений PC1, что указывает на системное изменение комплекса почвенных свойств. Вариант с фосфогипсом располагался преимущественно в нижней части графика (отрицательные значения PC2), формируя отдельное направление вариации, отличное как от контроля, так и от других мелиорантов. Это свидетельствует о специфическом влиянии данного мелиоранта на структуру взаимосвязей между показателями.

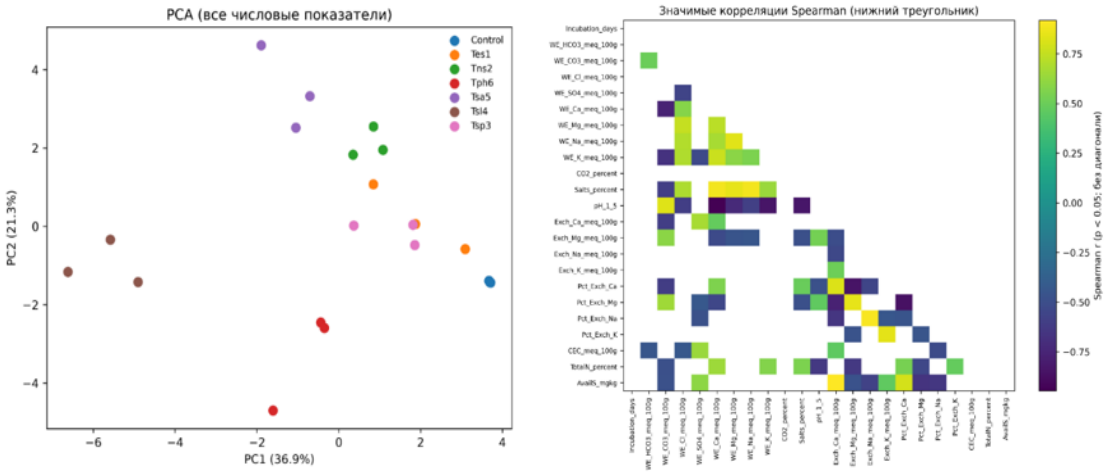


Рисунок 2 - Многомерный (А) и корреляционный анализ взаимосвязи между почвенными параметрами мелкого солонца (Spearman, p<0,05)

Варианты с жидкой наносерой (Tns2) и элементарной серой (Tes1) занимали промежуточное положение, частично перекрываясь с контрольным вариантом, что указывает на умеренную степень изменений по сравнению с исходным состоянием почвы. Вариант с серной пульпой (Tsp3) отличился разбросанным расположением точек в центральной области графика, что показывает неоднородность реакции ее почвенных показателей. В целом PCA подтвердил, что различные мелиоранты вызывают неодинаковые системные изменения комплекса почвенных свойств. Наиболее выраженное интегральное отличие от контроля наблюдалось для жидкой серы (Tsl4) и серной кислоты (Tsa5), тогда как элементарная сера (Tes1) и жидкая наносера (Tns2) демонстрировали более умеренные трансформации. Полученные результаты свидетельствуют о том, что изменение реакции почвы, обменного комплекса и ионного состава формирует различимые многомерные профили воздействия мелиорантов, что подтверждает целесообразность использования интегрального статистического подхода при оценке их эффективности.

Анализ ранговых корреляций Спирмана позволил выявить статистически значимые взаимосвязи между показателями солевого состава, обменного комплекса и реакцией почвенной среды (рисунок 2). Для интерпретации учитывались только коэффициенты корреляции, достоверные при p<0,05. Отмечена выраженная положительная корреляция между содержанием сульфатов, натрия и магния в водной вытяжке, а также их связью с суммой солей. Это указывает на совместное формирование солевого фона почвы и подтверждает, что основную долю растворимых солей формируют именно сульфаты натрия и магния. При внесении кальцийсодержащих или серосодержащих мелиорантов возможно образование легкорастворимых солей, в частности Na_2SO_4). Таким образом, сульфат-ион выполняет двойную функцию: участвует в образовании растворимых натриевых солей и способствует поддержанию ионной силы раствора, влияя на равновесие обменных реакций. Содержание хлор иона также демонстрировало положительные связи с другими растворимыми катионами, отражая интегральный характер солевого накопления.

В солонцовом горизонте водородный показатель имел отрицательные корреляции с содержанием раствори-

мых солей и обменного натрия. Это свидетельствует о том, что снижение щелочности сопровождается уменьшением натриевой нагрузки и общей солёности почвенного раствора. Одновременно выявлены положительные корреляции pH с показателями, характеризующими кальциевую насыщенность обменного комплекса, что отражает связь реакции среды с состоянием катионного баланса. Процентная доля обменного натрия демонстрировала сильные отрицательные корреляции с процентной долей обменного кальция и магния, что отражает антагонистический характер распределения катионов в обменном комплексе солонцовой почвы. Обменный кальций и магний положительно коррелировали между собой, что указывает на их совместное участие в стабилизации почвенной коллоидной фазы.

Ёмкость катионного обмена (CEC) проявляла положительные связи с содержанием кальция и магния. Корреляционная структура подтверждает взаимосвязь функционально связанных блоков показателей: солевой блок (растворимые ионы, сумма солей, обменный натрий) и обменный блок (CEC, обменный кальций и магний, процентная доля катионов). Реакция почвы (pH) выступает интегральным показателем, связывающим оба блока, и отражает перераспределение катионов в системе «раствор - обменный комплекс».

Таким образом, статистически значимые корреляции подтверждают, что внесение серных и серосодержащих мелиорантов приводят к согласованным изменениям солевого состава и катионного баланса солонцового горизонта мелких солонцов, а не к изолированным изменениям отдельных показателей. Поскольку испытание серных и серосодержащих мелиорантов осуществлялось в контролируемых условиях, то ее результаты имеют определённые ограничения, ввиду того, что во время инкубации отсутствовало влияние естественных факторов почвообразования, условий режимов и растительного покрова. В связи с этим полученные данные требуют дополнительной верификации в полевых экспериментах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое лабораторное исследование показало, что внесение серных и серосодержащих мелиорантов в мелкие солонцы в условиях 30-дневной инкубации вызывает системные изменения химических свойств, затрагивающие как почвенный раствор, так и обменный комплекс. Наиболее чувствительным показателем оказалась реакция почвенной среды (pH), снижение которой наблюдалось во всех вариантах опыта. В случае жидкой серы (Tsl4) уменьшение достигало значительной величины (pH 7,75), относительно контроля (8,73), что свидетельствует о высокой реакционной активности мелиоранта и активном изменении кислотно-щелочного состояния почвы. Подкисление среды способствовало перераспределению катионов в системе «раствор - обменный комплекс» и создавало условия для замещения обменного натрия кальцием. Об этом свидетельствовало снижение доли обменного натрия в поглощающем комплексе до 7,80 и 7,50% от CEC на вариантах с жидкой серой (Tsl4) и серной кислотой (Tsa5) по сравнению с контрольным вариантом (8,40% от CEC). Вытесненный обменный натрий поступил в раствор, где ее содержание на указанных вариантах выросло до 4,08 и 4,05 мг-экв в отношении контроля (3,12 мг-экв). Кроме того, в поглощающем комплексе отмеченных вариантов опыта существенно увеличивается доля обменного кальция (58,10 и 59,80% от CEC) и существенно снижается доля обменного магния (33,40 и 32,30% от CEC), как среди мелиорантов, так и в отношении контроля (44,20 и 47,20% от CEC). Применение серных и серосодер-

жащих мелиорантов на мелких солонцах также способствует снижению концентрации гидрокарбонатов и нормальных карбонатов. В отношении первого самый минимум был установлен на вариантах с серной кислотой (0,47 мг-экв) и фосфогипсом (0,35 мг-экв). Нулевое значения содержания нормальных карбонатов было достигнуто на вариантах жидкой серой (Tns2, Tsl4), серной кислотой (Tsa5) и фосфогипсом (Tph6).

Корреляционный анализ выявил устойчивые антагонистические связи между долей обменного натрия и кальция, подтверждая ключевую роль Ca–Na-обмена в механизме химической мелиорации. Положительные взаимосвязи между растворимыми сульфатами, натрием и суммой солей указывают на формирование растворимых натриевых соединений как промежуточного этапа трансформации солонцовой почвы. Многомерный анализ (PCA) продемонстрировал чёткое разграничение вариантов опыта в пространстве главных компонент, что свидетельствует о комплексном характере воздействия серосодержащих мелиорантов. Полученные данные подтверждают, что эффективность химической мелиорации определяется не изолированным изменением отдельных показателей, а согласованной перестройкой химической системы почвы. Применение комплексного статистического подхода позволило выявить как прямые эффекты обработки, так и внутренние функциональные связи между почвенными показателями, что повышает достоверность оценки мелиоративной эффективности серосодержащих мелиорантов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант No. AP26101627).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seitkali N., Naushabayev A., Mazkirat S., Vassilina T. Assessing the efficacy of ameliorants on saline-sodic soils: Laboratory insights for reclamation strategies // Eurasian Journal of Soil Science. - 2023. - № 4. - С. 328–334.

2. Ministry of Agriculture of the Republic of Kazakhstan. Consolidated analytical report on the state and use of lands of the Republic of Kazakhstan for 2022. - Astana, 2023.

3. IUSS Working Group. World Reference Base for Soil Resources 2014: International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. - World Soil Resources Report. - 2014. - № 106. - P. 12.

4. Richards L.A. (ed.). Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. - Washington, DC: United States Department of Agriculture, U.S. Salinity Laboratory, 1954.

5. Мухаметкаримов К.М., Кенжегулова С.О. Трещинообразование - естественный и антропогенный фактор деградации черноземов южных северо-востока Казахстана // Наука вчера, сегодня, завтра. - 2017. - № 7. - С. 51–62.

6. Елешев Р.Е., Конопьянов К.Е., Мухаметкаримов К.М., Кубенкулов К.К., Аскаров С.У., Поршнев Д.Г. Деградационные процессы на южных карбонатных черноземах при зернопаровой системе земледелия на северо-востоке Казахстана // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. - Алматы: Бастау, 2008. - С. 21–25.

7. Suleimenov M., Saparov A., Akshalov K., Kaskarbayev Z. Land degradation issues in Kazakhstan and measures to address them: research and adoption // Environmental Science, Geography. - 2011. – URL: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:210051492.

8. Систематический список и основные диагностические показатели почв равнинной территории Республики Казахстан. - Т. I. - Алма-Ата, 1995.

9. Lyubimova I.N., Novikova A.F. Changes in the properties of solonetzic soil complexes in the dry steppe zone under anthropogenic impacts // Eurasian Soil Science. - 2016. - Т. 49. - № 5. - P. 581–590.

10. International Organization for Standardization. Soil Quality - Sampling - Part 1: Guidance on the Design of Sampling Programmes (ISO Standard No. 10381-1:2002). - Geneva, Switzerland: ISO, 2002.

11. Methodical Instructions for Laboratory and Practical Exercises in Reclamation Soil Science. - M., USSR, 1981. - Original work published in Russian.

12. Estefan G., Sommer R., Ryan J. Methods of Soil, Plant, and Water Analysis. - 3rd ed. - Beirut: ICARDA, 2013.

13. Carter M.R., Gregorich E.G. (eds.). Soil Sampling and Methods of Analysis. - 2nd ed. - Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.

14. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. - 9th ed. - Wiley, 2017.

15. Field A. Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics. - 5th ed. - Sage, 2018.

16. Zuur A.F., Ieno E.N., Smith G.M. Analyzing Ecological Data. - Springer, 2007.

17. Legendre P., Legendre L. Numerical Ecology. - 3rd ed. - Elsevier, 2012.

18. Abdi H., Williams L.J. Principal component analysis // Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics. - 2010. - Vol. 2. - № 4. - P. 433–459.

19. Глобальный биогеохимический цикл серы и влияние на него деятельности человека. - М.: Наука, 1983.

REFERENCES

1. Seitkali N., Naushabayev A., Mazkirat S., Vassilina T. Assessing the efficacy of ameliorants on saline-sodic soils: Laboratory insights for reclamation strategies // Eurasian Journal of Soil Science. - 2023. - T. 12. - № 4. - P. 328–334.

2. Ministry of Agriculture of the Republic of Kazakhstan. Consolidated analytical report on the state and use of lands of the Republic of Kazakhstan for 2022. - Astana, 2023.

3. IUSS Working Group. World Reference Base for Soil Resources 2014: International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. - World Soil Resources Report. - 2014. - № 106. - P. 12.

4. Richards L.A. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. - Washington, DC: United States Department of Agriculture, U.S. Salinity Laboratory, 1954.

5. Muhametkarimov K.M., Kenzhegulova S.O. Treshinoobrazovanie - estestvennyj i antropogennyj faktor degradacii chernozemov yuzhnyh severo-vostoka Kazahstana // Nauka vchera, segodnya, zavtra. - 2017. - № 7. - P. 51–62.

6. Eleshev R.E., Konopyanov K.E., Muhametkarimov K.M., Kubenkulov K.K., Askarov S.U., Porshnev D.G. Degradacionnye processy na yuzhnyh karbonatnyh chernozemah pri zernoparovoj sisteme zemledeliya na severo-vostoke Kazahstana // Vestnik selskohozyajstvennoj nauki Kazahstana. - Almaty: Bastau, 2008. - P. 21–25.

7. Suleimenov M., Saparov A., Akshalov K., Kaskarbayev Z. Land degradation issues in Kazakhstan and measures to address them: research and adoption // Environmental Science, Geography. - 2011. – URL: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:210051492

8. Sistematicheskij spisok i osnovnye diagnosticheskie pokazateli pochv ravninnoj territorii Respubliki Kazahstan. - T. I. - Alma-Ata, 1995.

9. Lyubimova I.N., Novikova A.F. Changes in the properties of solonetzic soil

complexes in the dry steppe zone under anthropogenic impacts // Eurasian Soil Science. - 2016. - T. 49. - № 5. - P. 581–590.

10. International Organization for Standardization. Soil Quality - Sampling - Part 1: Guidance on the Design of Sampling Programmes (ISO Standard No. 10381-1:2002). - Geneva, Switzerland: ISO, 2002.

11. Methodical Instructions for Laboratory and Practical Exercises in Reclamation Soil Science. - Moscow, USSR, 1981. - Original work published in Russian.

12. Estefan G., Sommer R., Ryan J. Methods of Soil, Plant, and Water Analysis. - 3rd ed. - Beirut: ICARDA, 2013.

13. Carter M.R., Gregorich E.G. Soil Sampling and Methods of Analysis. - 2nd ed. - Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.

14. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. - 9th ed. - Wiley, 2017.

15. Field A. Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics. - 5th ed. - Sage, 2018.

16. Zuur A.F., Ieno E.N., Smith G.M. Analyzing Ecological Data. - Springer, 2007.

17. Legendre P., Legendre L. Numerical Ecology. - 3rd ed. - Elsevier, 2012.

18. Abdi H., Williams L.J. Principal Component Analysis // Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics. - 2010. - T. 2. - № 4. - P. 433–459.

19. Global'nyy biogeokhimicheskiy tsikl sery i vliyaniye na nego deyatel'nosti cheloveka. - M.: Nauka, 1983.

ТҮЙІН

А.Х. Наушабаев[1], С.С. Наушабаева[1], Н. Сейткали[1], Т.К. Василина, К.О. Караева[1]*, Н.П. Аубакиров[1]

АҚМОЛА ОБЛЫСЫНЫҢ СЕМИАРИДТІК АЙМАҒЫНДАҒЫ ЕГІСТІКТЕ ДЕГРАДАЦИЯЛАНҒАН КЕБІР ТОПЫРАҚТАРДЫҢ ИОНДЫҚ КЕШЕНІНІҢ КҮКІРТТІ МЕЛИОРАНТТАР ӘСЕРІНЕН ӨЗГЕРУІ: ЗЕРТХАНАЛЫҚ ЗЕРТТЕУ

*[1]Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, 050010, Алматы, Абай даңғылы, 8, Қазақстан, *e-mail: askhat.naushabayev@kaznaru.edu.kz*

Ақмола облысының семиаридтік аймағындағы ұсақ кебір топырақтары алмаспалы магний мен натрийдің жоғары мөлшерімен, күшті сілтілі ортасымен және құрылымының тұрақсыздығымен сипатталады. Осыған қарамастан, олар суарылмайтын егістікке жерлерге белсенді түрде жұмылдырылады және антропогендік деградацияға ұшыраған. Оларды қалпына келтіру стратегиясын әзірлеу үшін ұсақ кебір топырақтардың химиялық қасиеттеріне алты күкірт және күкірт құрамдас мелиоранттардың қысқа мерзімді әсерін бағалау мақсатында модельдік зертханалық зерттеулер жүргізілді. Құрамында күкірт бар мелиоранттарды ұсақ сортаңдарға енгізу топырақ ерітіндісінің құрамына да, топырақты сіңіру кешенінің күйіне де әсер ететін өзара байланысты физика-химиялық процестер кешенін бастады. Өзгерістер жүйелі болған, оны бір факторлы талдау және PCA мен корреляциялық талдау нәтижелері растайды. Топырақтың pH-ы ең сезімтал параметр болды, оның мәні барлық нұсқаларда төмен қарай ығысқан. Сонымен қатар, тәжірибелік нұсқалар арасында қышқылдану дәрежесі өзгеріп отырған. Мелиоранттардың ішінде сұйық күкіртті қолдану бақылау нұсқасымен салыстырғанда pH-тың 8,73-тен 7,75-ке дейін максималды төмендеуіне ықпал етті. Бұл «топырақ ерітіндісі - алмаспалы кешені» жүйесіндегі қышқыл-негіз балансының жылдам өзгеруін көрсетеді. Сұйық күкірт және күкірт қышқылы енгізілген нұсқалардың нәтижелері бақылаудан алшақтау болды, бұл олардың еритін иондар мен алмасу кешенінің параметрлеріндегі ең үлкен өзгерістерді көрсетті. Бұл мелиоранттар 30 күндік инкубация кезінде жеке параметрлерге емес, ұсақ тұзды сулардың бүкіл химиялық жүйесіне әсер етті. Көп реттік талдау (PCA) мәліметтерінен күкірт құрамдас мелиоранттардың ұсақ кебір топырақтарға әсер ету қарқын-

дылығына байланысты олар жеке кластерлер түзетінін көрсетті. Корреляциялық талдау алмаспалы натрий мен кальцийдің үлестері арасындағы айқын антагонистік байланыстарды анықтады, бұл кебір топырақтардың өзгеруіндегі Ca-Na алмасу процестерінің негізгі рөлін растайды. Осылайша, зерттеу нәтижелері қысқа мерзімде топырақ ерітіндісі мен ұсақ тұзды сіңіру кешенінің химиялық құрамын өзгерткен күкірті бар ең тиімді мелиоранттарды анықтауға мүмкіндік берді.

Түйінді сөздер: автоморфты ұсақ кебірлер, семиаридтік аймақ, Ақмола облысы, деградация, мелиорация, күкірт және күкірт құрамдас мелиоранттар.

SUMMARY

A. Naushabayev[1], S. Naushabayeva[1], N. Seitkali[1], T. Vassilina, K. Karayeva[1]*, N. Aubakirov

TRANSFORMATION OF THE IONIC COMPLEX OF DEGRADED SOLONETZ SOILS OF THE ARABLE LAND OF THE SEMIARIDE ZONE OF THE AKMOLA REGION UNDER THE INFLUENCE OF SULFUR AMELIORANTS: A LABORATORY STUDY

*[1]Kazakh National Agrarian Research University, 050010, Almaty, Abai ave., 8, Kazakhstan, *e-mail: askhat.naushabayev@kaznaru.edu.kz*

Small solonetz soils in the semiarid zone of the Akmola region are characterized by elevated levels of exchangeable magnesium and sodium, a highly alkaline pH, and structural instability. Despite this, they are actively converted into non-irrigated arable land and are susceptible to anthropogenic degradation. To develop a restoration strategy, model laboratory studies were conducted to assess the short-term impact of six sulfur and sulfur-containing ameliorants on the chemical properties of small solonetz soils. The introduction of sulfur-containing ameliorants into shallow salt wells initiated a complex of interrelated physico-chemical processes affecting both the composition of the soil solution and the state of the soil absorbing complex. The changes were systemic, as confirmed by both single-factor analysis and the results of PCA and correlation analysis. The most sensitive parameter was soil pH, which shifted downward in all treatments. Moreover, the degree of acidification varied between the experimental treatments. Among the ameliorants, the use of liquid sulfur contributed to the greatest decrease in pH, from 8.73 to 7.75, compared to the control treatment. This indicates a rapid change in the acid-base balance in the "soil solution - exchange complex" system. The treatments with liquid sulfur and sulfuric acid were the most distant from the control, demonstrating the greatest shifts in both soluble ions and exchange complex parameters. During the monthly incubation, these ameliorants did not affect individual parameters, but the entire chemical system of small salt wells. Multivariate analysis (PCA) revealed that sulfur-containing ameliorants form distinct clusters depending on the intensity of their impact on small solonetz soils. Correlation analysis revealed pronounced antagonistic relationships between the proportions of exchangeable sodium and calcium, confirming the key role of Ca–Na exchange processes in the transformation of solonetzic soils. Thus, the research results made it possible to identify the most effective sulfur-containing ameliorants, which in a short time changed the chemical composition of the soil solution and the absorbing complex of small salt deposits.

Keywords: automorphic small solonetz soils, semiarid zone, Akmola region, degradation, reclamation, sulfur and sulfur-containing ameliorants

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. Наушабаев Асхат Хамитович - ассоциированныи профессор кафедры «Почвоведение, агрохимия и экология», PhD, https://orcid.org/0000-0001-8291-265X, e-mail: askhat.naushabayev@kaznaru.edu.kz

2. Наушабаева Светлана Серікқызы - младший научный сотрудник, магистр, https://orcid.org/0009-0006-8518-7493, e-mail: sveta.naushabaeva@mail.ru

3. Сейткали Нурзихан **-** старший преподаватель кафедры «Почвоведение, агрохимия и экология», PhD, https://orcid.org/0000-0003-0942-8188,
e-mail: nurzi.seitkali@mail.ru

4. Василина Турсунай Кажымуратовна - ассоциированныи профессор кафедры «Почвоведение, агрохимия и экология», PhD, https://orcid.org/0000-0003-0554-9839, e-mail: v_tursunai@mail.ru

5. Караева Карлыга Оспановна **-** старший преподаватель кафедры «Почвоведение, агрохимия и экология», PhD, https://orcid.org/0000-0002-4074-5352, e-mail: karlygakaraeva@gmail.com

6. Аубакиров Нурымжан Паржанович **-** старший преподаватель кафедры «Почвоведение, агрохимия и экология», PhD, https://orcid.org/0000-0002-7340-2735, e-mail: aubakirov.nurimzhan@yandex.ru