

Влияние молотой серы на альгоцианофлору щелочных засоленных почв

© 2024. Л. В. Кондакова^{1,2}, д. б. н., профессор, с. н. с.,
Н. В. Сырчина², к. х. н., доцент, с. н. с.,

И. А. Кондакова², к. фил. н., доцент,

¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

²Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

e-mail: ecolab2@gmail.com

Проведено изучение влияния молотой серы (S⁰), используемой в качестве химического мелиоранта для щелочных засоленных почв, а также серы с добавками минеральных и органических удобрений на видовое разнообразие и численность почвенных фототрофных микроорганизмов – водорослей и цианобактерий. Исследование проводили в лабораторных условиях на примере солонцевой почвы. Тип солонца – автоморфный, подтип – полупустынный. Внесение молотой серы, а также серы с добавками минеральных и органических удобрений в щелочную засоленную почву привело к существенному изменению её химических и физико-химических свойств: снижению pH, увеличению электропроводности, повышению содержания в почвенной вытяжке таких макроэлементов, как фосфор, калий, кальций, магний. Содержание растворимых карбонатов и гидрокарбонатов уменьшилось. Изменение химического состава и свойств почвы оказало влияние на видовой состав и численность почвенной альгоцианофлоры. В почве контрольного варианта выявлены представители 16 видов, в том числе Cyanobacteria – 10, Bacillariophyta – 4, Chlorophyta – 2. В почве опытных вариантов выявлено 25 видов: Cyanobacteria – 14, Chlorophyta – 4, Bacillariophyta – 7. Видовой состав альгоцианофлоры контрольного и опытных вариантов сохраняет сходство 64%. Внесение в почву минеральной и органической добавки способствовало увеличению видового разнообразия микрофототрофов почв. Добавка серы способствовала росту численности их клеток. Наибольшее видовое разнообразие микрофототрофов было выявлено в варианте с внесением в почву серы на фоне комплекса минеральных и органических удобрений.

Ключевые слова: фототрофные микроорганизмы, водоросли, цианобактерии, засоленные почвы, удобрения.

The ground sulphur effect on algocyanoflora of alkali-saline soil

© 2024. L. V. Kondakova^{1,2} ORCID: 0000-0002-2190-686X *

N. V. Syrchina² ORCID: 0000-0001-8049-6760 *

I. A. Kondakova² ORCID: 0000-0001-9336-8709 *

¹Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Science,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

²Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

e-mail: ecolab2@gmail.com

The paper considers the impact of ground sulphur (S⁰) used as a chemical ameliorant for alkali-saline soils, as well as of sulphur with mineral and organic fertilizers, on species diversity and abundance of soil phototrophic microorganisms – algae and cyanobacteria. The research was carried out in laboratory conditions through the example of alkali soil. The alkali type is automorphic, its subtype is brown semiarid. Application of ground sulphur, as well as sulphur with mineral and organic fertilizer additives to alkali-saline soil caused considerable change in its chemical and physico-chemical properties: pH decrease, and increase in conductivity and phosphorus, potassium, magnesium, and calcium content in soil extract. Soluble carbonates and hydrocarbonates content decreased. Changes in soil properties and chemical composition affected species composition and abundance of soil algocyanoflora. 16 species, including Cyanobacteria – 10, Bacillariophyta – 4, Chlorophyta – 2, were found in the control soil. 25 species of soil microphototrophs, such as Cyanobacteria – 14, Chlorophyta – 4, Bacillariophyta – 7, were found in the soil of experiment variants. Algocyanoflora

species composition of control and experiment variants remains mostly the same (64%). Application of mineral and organic additives caused growth of algocyanoflora species diversity in soil. Sulphur application contributed to microphototrophs cells increasing in number. The highest species diversity of microphototrophs found in the variant with sulfur and a complex of mineral and organic fertilizers.

Keywords: phototrophic microorganisms, algae, cyanobacteria, saline soils, fertilizers.

Засолённые почвы (ЗП) – почвы засушливых зон с повышенным (более 0,25%) содержанием легкорастворимых в воде минеральных солей (хлоридов, сульфатов, карбонатов натрия, кальция и магния). Восстановление ЗП входит в число важнейших проблем, стоящих перед современной аграрной наукой. По данным ФАО, общая площадь ЗП на нашей планете превышает 833 млн. га. Большинство ЗП расположено в районах с развитым поливным земледелием. Особую опасность для сельскохозяйственной деятельности представляют щелочные засоленные почвы, для которых характерны неудовлетворительные водные и физические свойства, дефицит питательных элементов (особенно железа, фосфора, марганца, цинка и бора), наличие фитотоксичных соединений алюминия. Для устранения негативных свойств щелочных почв широкое применение находят химические реагенты (мелиоранты), способствующие снижению рН (гипс, хлорид кальция, серная кислота, сера, пирит, сульфаты железа и алюминия и т. п.). Влияние химических мелиорантов на физические и химические свойства почвы в настоящее время хорошо изучено. Меньше сведений о том, какое воздействие они оказывают на почвенную микробиоту, в частности, на почвенные водоросли и цианобактерии (ЦБ). Согласно результатам многочисленных исследований, почвенные микрофототрофы, благодаря своим уникальным свойствам и способности выживать в условиях сильного засоления и экстремальных значений рН, играют исключительно важную роль в восстановлении засоленных почв [1]. Альгоцианобактериальные сообщества ЗП представлены солеустойчивыми ЦБ и одноклеточными зелёными и диатомовыми водорослями. Синтезируемые ЦБ экзо-полисахариды защищают растения от солевого стресса, связывают ионы Na^+ , улучшают структуру почвы и повышают её водоудерживающие свойства [2, 3]. Среди видов, хорошо растущих в ЗП, всегда обнаруживаются азотфиксирующие ЦБ из порядка *Nostocales*. Образование актинет, характерное для *Nostocales*, возможно, является одним из приспособлений к сохранению жизни в условиях длительного засо-

ления [4]. Натрий, как химический элемент, необходим для роста и развития ЦБ, при его недостатке падает содержание синего пигмента – фикоцианина [5]. За счёт способности к фотосинтезу, фиксации атмосферного азота и солибилизации фосфатов почвенные ЦБ способствуют улучшению минерального питания растений и накоплению в почве органического вещества [6, 7]. На территориях, лишённых растительности и почвенного покрова, водоросли и ЦБ вносят существенный вклад в формирование примитивных почв, образуя начальную стадию сукцессий. Ассимилируя в процессе жизнедеятельности углекислый газ, водоросли и ЦБ подщелачивают среду, выделяемый при фотосинтезе кислород способствует улучшению дыхания корней высших растений и жизнедеятельности аэробных микроорганизмов. По подсчётам Э. А. Штиной [4], на различных ЗП количество органического вещества колеблется в пределах от 4,67 до 6,25 ц/га. Особенностью органического вещества альгоцианобактериальных корочек является высокое содержание азота.

Засолённые почвы широко распространены в Центральной Азии, а также в Западной Сибири [8]. Отмечено, что характерной чертой глубоко столбчатого солонца и лугового солончака является бурное развитие ЦБ, на их долю приходится 62%.

Изучение альгоцианофлоры почв на территории Казахстана показало ведущую роль в видовом составе микрофототрофов ЦБ, второе место занимали зелёные водоросли, затем жёлтозелёные и диатомовые. Из ЦБ более всего видов было отмечено из пор. *Oscillatoriales* и *Nostocales*, из зелёных – пор. *Chlorococcales* [9].

Хорошо известна способность ЦБ вступать в симбиотические ассоциации с грибами и растениями (мохообразными, птеридофитами, голосеменными, покрытосеменными), а также выделять в окружающую среду разнообразные биологически активные вещества-стимуляторы роста, смягчающие абиотический стресс и защищающие сельскохозяйственные культуры от фитопатогенов [10, 11].

В настоящее время проводятся интенсивные исследования, направленные на

разработку технологий применения ЦБ и водорослей для рекультивации ЗП. Полученные результаты свидетельствуют о высоком биотехнологическом потенциале данных микророботов, однако культивирование эффективных штаммов в промышленных масштабах требует значительных материальных затрат [12]. Более доступными могут стать технологии и приёмы, ориентированные на подбор химических мелиорантов, оказывающих комплексное положительное воздействие на ЗП, включая улучшение химического состава и стимулирование развития аборигенных альго-цианобактериальных сообществ. Исследования в данном направлении представляют высокую актуальность и практическую значимость. Одним из перспективных мелиорантов для щелочных ЗП может стать молотая сера (S^0). Сера является одним из необходимых элементов питания водорослей и ЦБ. Большинство водорослей усваивают окисленные соединения серы, восстанавливая их в процессе обмена веществ. Есть сведения о возможности утилизации некоторыми водорослями восстановленных форм серы (сероводорода, сульфида). Некоторые ЦБ накапливают в своих клетках свободную серу [5]. Согласно результатам исследований, совместное внесение S^0 и микроводорослей приводит к выраженному синергическому взаимодействующему эффекту, что способствует улучшению состояния щелочных ЗП [13]. Цианобактерии и сероокисляющие микроорганизмы могут образовывать между собой устойчивые сообщества, в которых реализуются сложные метаболические связи и отношения [14–16]. Многие ЦБ способны использовать S^0 для анаэробного темного дыхания [17, 18], что повышает их толерантность к воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды (недостаток кислорода или света).

Цель работы – изучить влияние молотой серы (S^0), используемой в качестве химического мелиоранта для щелочных засоленных почв, а также серы с добавками удобрений на видовое разнообразие и численность микроводорослей и цианобактерий.

Материалы и методы исследования

Для выполнения исследований использовали отход производства – смесь серы и диабазового грунта (код отхода 31211395204, класс опасности IV). Соответствующий отход образуется при хранении выделенной из природного газа S^0 на открытых площадках

(серных картах). Серо-грунтовая смесь (СГС) отличается низкой стоимостью, высокой мелиорирующей эффективностью, доступностью, а также наличием в составе уникальной сероокисляющей микробиоты, сформировавшейся в период хранения серы на грунте [19].

Перед проведением исследований СГС измельчали в фарфоровой ступке. Неподдающиеся измельчению включения диабаз удаляли. Подготовленный для внесения в почву материал (S^0) представлял собой тонкий порошок светло-серого цвета с содержанием S^0 80–85%. Размер частиц S^0 0,03–0,16 мм.

Изучение влияния выделенной из СГС серы на почвенную альгоцианофлору проводили в лабораторных условиях на примере образцов солонцевой почвы (далее субстрат), которые отбирали из надсолонцевых горизонтов с глубины 0–15 см. Тип солонца – автоморфный, подтип – полупустынный. Данные о свойствах субстрата приведены в таблице 1 (средние значения и стандартные отклонения результатов трёх параллельных определений). Удельную электропроводность, рН, содержание катионов и анионов (кроме CO_3^{2-} и HCO_3^-) определяли в водной вытяжке из почвы 1:5.

Субстрат высушивали в условиях лабораторного помещения, просеивали через сито с размером ячеек 2×2 мм и смешивали с добавками, согласно вариантам эксперимента.

Варианты эксперимента:

1. Субстрат без добавок (контроль);
2. Субстрат + S^0 (1 г/кг) + фосфоритная мука (2 г/кг);
3. Субстрат + комплексная добавка (состав вносимых с комплексной добавкой компонентов на 1 кг почвы: S^0 – 1 г; NH_4NO_3 – 0,2 г; фосфоритная мука – 1 г; хелат железа (Fe-ЭДТА) – 0,2 г; навоз крупного рогатого скота воздушно-сухой – 10 г);
4. Субстрат + S^0 (1,5 г/кг);
5. Субстрат + S^0 (4,5 г/кг).

Для проведения исследований использовали фосфоритную муку (ФМ) Чилисайского месторождения (Казахстан), массовая доля P_2O_5 – 17%.

В каждом варианте опытов изучали влияние внесённых добавок на свойства субстрата и проводили микробиологические исследования. Оценку влияния добавок на свойства субстрата проводили по таким показателям, как изменение рН, удельной электропроводности, содержание анионов и катионов в водной вытяжке из почвы 1:5. Сведения о методах исследования приведены в таблице 1. Образцы субстрата с добавками помещали в пластиковые контейнеры, увлажняли дистиллированной водой до влажности 65%

от полной влагоёмкости и оставляли в помещении при $t=22\pm 2$ °С в условиях естественного рассеянного освещения. Отбор проб для анализа проводили из верхних слоёв (0–2 см) методом конверта. Исследования выполняли в июне–августе 2023 г. Продолжительность опыта 2 месяца.

Выявление видового состава микрофототрофов проводили методом постановки водных и чашечных культур со «стёклами обрастания» [4]. Идентификацию водорослей и ЦБ проводили с использованием отечественных и зарубежных определителей. Названия видов приведены в соответствии с международной номенклатурой (www.algaebase.org).

Все исследования проводили в трёхкратной повторности. Статистическую обработку экспериментальных данных выполняли стандартными методами с помощью библиотеки функций Microsoft Excel. Статистическую значимость различий средних величин оценивали по *t*-критерию Стьюдента.

Результаты и обсуждение

Результаты анализа щелочного засоленного грунта показали, что внесение серосодержащих добавок привело к существенному изменению всех контролируемых показателей (табл. 2).

Согласно приведённым в таблице 2 данным, внесение всех добавок привело к снижению pH, увеличению электропроводности, уменьшению содержания карбонатов и гидрокарбонатов и повышению содержания других ионов в водной вытяжке из почвы. Наиболее значительный результат был достигнут в 3-м варианте. В данном варианте было выявлено самое высокое содержание водорастворимых фосфатов, играющих важную роль в минеральном питании ЦБ [20], а также K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} и SO_4^{2-} . В грунт данного варианта вносили комплексную добавку, содержащую не только S^0 , но и комплекс органических, минеральных и микроудобрений (хелат Fe), необходимых

Таблица 1 / Table 1

Свойства субстрата, используемого для проведения исследований
The properties of the substrate used in the research

Показатель Index	Значение / Amount	Метод анализа / Analysis method
CO_3^{2-} , мг-экв/100 г CO_3^{2-} , mg-eq/100 g	0,11±0,02	ГОСТ Р 59540-2021, метод титрования GOST R 59540-2021, titration method
HCO_3^- , мг-экв/100 г HCO_3^- , mg-eq/100 g	0,75±0,11	
pH	8,57±0,21	ГОСТ 26423-85 / GOST 26423-85
УЭП, мкСм/см Electric conductivity, $\mu S/cm$	260±24	
P_2O_5 , мг/дм ³ P_2O_5 , mg/dm ³	0,21±0,04	ПНД Ф 14.1:2:4.248- 07, фотометрический метод. Вытяжки из почвы готовили по ГОСТ 26423-85 PND F 14.1:2:4.248-07, photometric method. Soil extracts were made according to GOST 26423-85
Na^+ , мг/дм ³ Na^+ , mg/dm ³	71,6±7,9	
K^+ , мг/дм ³ K^+ , mg/dm ³	6,4±0,7	Хроматографическим методом на ионном хроматографе «Стайер» (НПК Аквилон, Россия) по ФР.1.31.2005.01724 и ФР.1.31.2008.01738. Пробы для хроматографического анализа предварительно фильтровали через фильтр «синяя лента» и разбавляли деионизированной водой в 20–25 раз / With chromatographic method using the ionic chromatograph “Stayer” (Scientific-Industrial complex Aquilon, Russia) according to FR.31.2005.01724 and FR.1.31.2008.01738. The samples for chromatographic analysis were filtered through the “blue ribbon” and they were 20–25 times diluted with deionized water
Mg^{2+} , мг/дм ³ Mg^{2+} , mg/dm ³	8,2±0,9	
Ca^{2+} , мг/дм ³ Ca^{2+} , mg/dm ³	29,7±3,4	
Cl^- , мг/дм ³ Cl^- , mg/dm ³	50,52±6,2	
NO_3^- , мг/дм ³ NO_3^- , mg/dm ³	4,07±0,52	
SO_4^{2-} , мг/дм ³ SO_4^{2-} , mg/dm ³	35,6±1,3	

Таблица 2 / Table 2

Влияние серосодержащих добавок на свойства щелочного засоленного грунта (через 2 месяца после внесения добавок) / Effect of sulfur-containing additives on the properties of alkali-saline soil (2 months after additive application)

Показатели Indices	Варианты / Variants				
	1	2	3	4	5
	Средние значения и стандартные отклонения показателей* Average indices and standard deviations of indices *				
CO ₃ ²⁻ , мг-экв/100 г CO ₃ ²⁻ , mg-eq/100 g	0,1±0,0	0,1±0,0	ниже предела обнаружения below the detection limit		
HCO ₃ ⁻ , мг-экв/100 г HCO ₃ ⁻ , mg-eq/100 g	0,75±0,05	0,40±0,04	0,27±0,03	0,20±0,02	0,20±0,02
pH	8,8±0,1	8,4±0,3	7,7±0,1	8,0±0,2	7,8±0,2
УЭП, мкСм/см Electric conductivity, μS/cm	262±24	348±42	986±49	596±61	909±44
P ₂ O ₅ , мг/дм ³ P ₂ O ₅ , mg/dm ³	0,21±0,04	0,40±0,08	0,84±0,13	0,32±0,05	0,55±0,08
Na ⁺ , мг/дм ³ Na ⁺ , mg/dm ³	71,6±7,9	70,6±8,8	137,7±15,3	154,5±16,4	170,9±18,8
K ⁺ , мг/дм ³ K ⁺ , mg/dm ³	6,4±0,7	6,2±0,8	23,5±2,6	12,7±1,5	16,5±1,8
Mg ²⁺ , мг/дм ³ Mg ²⁺ , mg/dm ³	8,2±0,9	7,4±1,2	65,4±7,2	38,3±4,5	55,9±6,8
Ca ²⁺ , мг/дм ³ Ca ²⁺ , mg/dm ³	29,7±3,4	34,2±4,4	200,9±22,4	114,9±12,4	166,7±20,5
Cl ⁻ , мг/дм ³ Cl ⁻ , mg/dm ³	50,52±6,2	52,22±6,4	71,1±7,6	231,1±21,8	148,6±13,7
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³ NO ₃ ⁻ , mg/dm ³	4,07±0,52	4,87±0,61	5,54±0,61	12,72±1,64	0,56±0,09
SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³ SO ₄ ²⁻ , mg/dm ³	35,6±1,3	262,6±32,4	504,8±52,1	272,9±24,6	432,0±38,5

Примечание: * – полужирным шрифтом выделены статистически значимые различия между экспериментальным и контрольным вариантами ($p < 0,05$). Варианты: 1. Субстрат без добавок (контроль); 2. Субстрат + S⁰ (1 г/кг) + фосфоритная мука (2 г/кг); 3. Субстрат + комплексная добавка; 4. Субстрат + S⁰ (1,5 г/кг); 5. Субстрат + S⁰ (4,5 г/кг).

Note: * – statistically significant difference between experimental and control variants are highlighted in bold ($p < 0.05$). Variants: 1. Substrate clear (control); 2. Substrate + S⁰ (1 g/kg) + ground phosphate (2 g/kg); 3. Substrate + complex additive; 4. Substrate + S⁰ (1.5 g/kg); 5. Substrate + S⁰ (4.5 g/kg).

Таблица 3 / Table 3

Таксономический состав водорослей и цианобактерий засоленных почв
Algae and cyanobacteria taxonomic composition in saline soils

Варианты Variants	Цианобактерия	Chlorophyta	Bacillariophyta	Всего видов Species total number
1. Субстрат без добавок (контроль) Substrate clear (control)	10	2	4	16
2. Субстрат + S ⁰ + фосфоритная мука Substrate + S ⁰ + ground phosphate	12	3	5	20
3. Субстрат + комплексная добавка Substrate + complex additive	12	2	7	21
4. Субстрат + S ⁰ (1,5 г/кг) Substrate + S ⁰ (1.5 g/kg)	8	2	4	14
5. Субстрат + S ⁰ (4,5 г/кг) Substrate + S ⁰ (4.5 g/kg)	5	1	4	10

Видовое разнообразие водорослей и цианобактерий
Algae and cyanobacteria species diversity in experimental variants

Таксоны, виды / Taxons, species		Варианты / Variants				
		1	2	3	4	5
Cyanobacteria						
1	<i>Leptolyngbya angustissima</i> (W. et G.S. West) Anagn. et Kom.	+		+	+	
2	<i>Leptolyngbya foveolarum</i> (Rabenh. et Gom.) Anagn. et Kom.		+	+		
3	<i>Leptolyngbya fragilis</i> (Gom.) Anagn. et Kom.	+				
4	<i>Microcoleus vaginatus</i> (Vauch.) Gom.	+	+	+	+	
5	<i>Microcoleus vaginatus f. monticola</i> (Kütz.) Elenk.			+		
6	<i>Microcoleus chthonoplastes</i> (Fl. Dan.) Thur.	+	+	+	+	
7	<i>Nodularia harveyana</i> (Thwait.) Thur.	+	+	+	+	+
8	<i>Nostoc paludosum</i> Kütz.	+	+	+	+	+
9	<i>Nostoc punctiforme</i> (Kütz.) Hariot	+	+	+	+	
10	<i>Nostoc</i> sp.		+	+		
11	<i>Phormidium autumnale</i> (Ag.) Gom.	+	+	+	+	
12	<i>Phormidium formosum</i> (Bory ex Gom.) Anagn. et Kom.		+		+	
13	<i>Phormidium jadinianum</i> Gom.		+	+		+
14	<i>Phormidium corium</i> (Ag.) Gom.	+	+	+		+
15	<i>Phormidium henningsii</i> Lemm.	+	+	+		+
Всего Cyanobacteria / The total of Cyanobacteria		10	12	12	8	5
Chlorophyta						
16	<i>Chlorella vulgaris</i> Beijer.		+			+
17	<i>Chlorella mirabilis</i> V. Andr.				+	
18	<i>Chlorococcum</i> sp.	+	+	+		
19	<i>Gongrosira debaryana</i> Rabenh.	+	+	+	+	
Всего Chlorophyta / The total of Chlorophyta		2	3	2	2	1
Bacillariophyta						
20	<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehr.) Grun. in Cleve et Grun.	+	+	+	+	+
21	<i>Navicula</i> sp.	+	+	+	+	+
22	<i>Luticola mutica</i> (Kütz.) Mann in Round et al.	+				
23	<i>Navicula atomus</i> (Kütz.) Grun.			+		+
24	<i>Navicula minima</i> Grun. in Van Heurck		+	+		
25	<i>Navicula pelliculosa</i> (Breb.) Hilse	+	+	+	+	+
26	<i>Pinnularia borealis</i> Ehr.			+		
27	<i>Pinnularia</i> sp.		+	+	+	
Всего Bacillariophyta / The total of Bacillariophyta		4	5	7	4	4
Итого / Total		16	20	21	14	10

Примечание: описание вариантов см. в таблице 2.
Note: for descriptions of variants see Table 2.

для нормальной фотосинтетической деятельности микрорототрофов [24].

Изученная нами альгоцианофлора была представлена невысоким видовым разнообразием. В контрольном и опытных вариантах выявлено 27 видов почвенных микрорототрофов: Cyanobacteria – 15, Chlorophyta – 4, Bacillariophyta – 8.

Ведущая роль принадлежала ЦБ и диатомовым водорослям (табл. 3). Обильно развивались мелкоклеточные диатомовые водоросли.

Из ЦБ большее число видов было отмечено из пор. Oscillatoriales.

Наименьшее видовое разнообразие микрорототрофов отмечено в вариантах с внесением серы (4 и 5). В варианте с внесением серы 4,5 г/кг число видов ЦБ, по сравнению с контролем, уменьшилось в 2 раза. Не были встречены *Leptolyngbya fragilis*, *L. angustissima*, *L. foveolarum*, *Microcoleus vaginatus*, *M. chthonoplastes* и др. В варианте 3 видовое разнообразие микрорототрофов, по сравне-

Таблица 5 / Table 5

Доминирующие виды альгоцианофлоры в вариантах опыта / Algosyanoflora dominating species in experimental variants

Варианты / Variants	Названия видов / Species
1. Субстрат без добавок (контроль) Substrate clear (control)	<i>Phormidium autumnale</i> , <i>Nostoc paludosum</i> , <i>Navicula pelliculosa</i>
2. Субстрат + S ⁰ + фосфоритная мука Substrate + S ⁰ + ground phosphate	<i>Hantzschia amphioxys</i> , <i>Navicula pelliculosa</i> , <i>Nostoc paludosum</i> , <i>Phormidium autumnale</i>
3. Субстрат + комплексная добавка Substrate + complex additive	<i>Hantzschia amphioxys</i> , <i>Navicula pelliculosa</i> , <i>Nostoc paludosum</i> , <i>Nodularia harveyana</i> , <i>Leptolyngbya foveolarum</i>
4. Субстрат + S ⁰ (1,5 г/кг) Substrate + S ⁰ (1.5 g/kg)	<i>Nostoc paludosum</i> , <i>Phormidium autumnale</i> , <i>Navicula pelliculosa</i>
5. Субстрат + S ⁰ (4,5 г/кг) Substrate + S ⁰ (4.5 g/kg)	<i>Nostoc paludosum</i> , <i>Navicula pelliculosa</i> , <i>Hantzschia amphioxys</i>

Таблица 6 / Table 6

Количественные показатели альгоцианофлоры в вариантах опыта (тыс. кл./г почвы)
Algosyanoflora quantitative indices in experimental variants (thousands of cells per 1 g of soil)

Варианты Variants	Cyanobacteria		Chlorophyta		Bacillariophyta		Всего / Total	
	1	2	1	2	1	2	1	2
1. Субстрат без добавок (контроль) Substrate clear (control)	46,4±9,2	8,02	502,4 ±61,5	86,9	29,3 ±7,1	5,08	577,9±77,7	100
2. Субстрат + S ⁰ + фосфоритная мука Substrate + S ⁰ + ground phosphate	18,9±1,6	7,23	231,7±18,0	88,8	10,4±1,6	3,98	261,1±21,3	100
3. Субстрат + комплексная добавка Substrate + complex additive	21,8±5,9	7,38	258,2±29,6	87,5	15,1±0,9	5,1	295,1±44,6	100
4. Субстрат + S ⁰ (1,5 г/кг) Substrate + S ⁰ (1.5 g/kg)	58,6±3,2	7,05	747,3±14,7	89,9	24,6±13,1	2,96	830,5±80,4	100
5. Субстрат + S ⁰ (4,5 г/кг) Substrate + S ⁰ (4.5 g/kg)	24,6±13,1	12,26	153,2±74,2	76,4	22,7±11,3	11,3	200,5±35,8	100

Примечание: 1 – число клеток; 2 – процент.

Note: 1 – the number of cells; 2 – percentage.

нию с контролем, увеличилось на 23%, что, вероятно, связано с комплексной добавкой удобрений (табл. 4).

Из ЦБ большее число видов было отмечено из пор. Oscillatoriales (11). Во всех вариантах опыта были отмечены ЦБ: *Nodularia harveyana* и *Nostoc paludosum* и диатомовые водоросли: *Hantzschia amphioxys*, *Navicula pelliculosa* (табл. 4). Данные виды достаточно широко распространены в ЗП.

Состав доминирующих видов в вариантах опыта сохраняет сходство (табл. 5). Во

всех случаях отмечены ЦБ *Nostoc paludosum* и диатомовая водоросль *Navicula pelliculosa*. Практически совпадает состав доминирующих видов контрольного варианта и четвертого. Только в варианте 3 в числе доминирующих видов отмечены ЦБ *Nodularia harveyana* и *Leptolyngbya foveolarum*.

Количественные характеристики водорослей и ЦБ (табл. 6) отражают наличие благоприятных абиотических факторов среды, присутствие элементов питания в почве.

Показатели численности микрофототрофов в разных вариантах варьировали: в контроле – $577,9 \pm 77,7$ тыс. кл./г почвы, в варианте с добавкой серы $1,5$ г/кг почвы – $830,5 \pm 80,4$ тыс. кл./г почвы, что в 4 раза выше контроля. В данном варианте высокую численность клеток обеспечили зелёные водоросли – $747,3 \pm 14,7$ тыс. кл./г почвы. Число клеток ЦБ также было наибольшим из сравниваемых вариантов – $58,6 \pm 3,2$ тыс. кл./г почвы. В варианте с добавкой серы в размере $4,5$ г/кг почвы численность клеток была ниже контроля почти в 3 раза – $200,5 \pm 35,8$ тыс. кл./г почвы. В вариантах с субстратом + S^0 + фосфоритная мука (2) и субстратом + S^0 + комплексная добавка (3) показатели численности микрофототрофов оказались близки: $261,1 \pm 21,3$ и $295,1 \pm 44,6$ тыс. кл./г почвы. Отличия между данными вариантами проявились в численности диатомовых водорослей (табл. 6). Наиболее высокий процент численности клеток во всех вариантах составляют зелёные водоросли.

Выводы

Внесение молотой серы, а также серы с добавками минеральных и органических удобрений в щелочную засоленную почву привело к существенному изменению её химических и физико-химических свойств: снижению pH, увеличению электропроводности, повышению содержания в почвенной вытяжке таких питательных элементов, как фосфор, калий, магний, кальций. Содержание растворимых карбонатов и гидрокарбонатов, обуславливающих щелочную среду почвенного раствора, во всех вариантах эксперимента уменьшилось.

Изменение химического состава и свойств почвы оказало существенное влияние на видовой состав и численность почвенной альгоцианофлоры. Видовой состав альгоцианофлоры контрольного и опытных вариантов сохраняет большое сходство (64%). В контрольной почве выявлены представители 16 видов, в том числе Cyanobacteria – 10, Bacillariophyta – 4, Chlorophyta – 2. В почве опытных вариантов выявлено 25 видов почвенных микрофототрофов: Cyanobacteria – 14, Chlorophyta – 4, Bacillariophyta – 7.

Внесение минеральной и органической добавки в субстрат способствовало увеличению видового разнообразия альгоцианофлоры почв.

Добавка серы способствовала росту численности клеток микрофототрофов. По

сравнению с контролем, численность клеток увеличилась в полтора раза. При этом видовое разнообразие понизилось почти в два раза.

Более высокие концентрации серы ($4,5$ г/кг) снижают численность клеток в субстрате (по отношению к контролю и варианту с добавлением $1,5$ г/кг серы) и видовое разнообразие микрофототрофов.

Литература

1. Sommer V., Mikhailyuk T., Glaser K., Karsten U. Uncovering unique green algae and cyanobacteria isolated from biocrusts in highly saline potash tailing pile habitats, using an integrative approach // *Microorganisms*. 2020. V. 8. No. 11. Article No. 1667. doi: 10.3390/microorganisms8111667
2. Rocha F., Esteban Lucas-Borja M., Pereira P., Muñoz-Rojas M. Cyanobacteria as a nature-based biotechnological tool for restoring salt-affected soils // *Agronomy*. 2020. V. 10. Article No. 1321. doi: 10.3390/agronomy10091321
3. El Sheek M.M., Zayed M.A., Elmosseel F.K.A., Hassan R.A. Effect of cyanobacteria isolates on rice seeds germination in saline soil // *Baghdad Science Journal*. 2018. V. 15. No. 1. P. 16–21. doi: 10.21123/bsj.2018.15.1.0016
4. Штина Э.А., Голлербах М.М. Экология почвенных водорослей. М., 1976. 143 с.
5. Горюнова С.В., Ржанова Г.Н., Орлеанский В.К. Синезелёные водоросли (биохимия, физиология, роль в практике). М.: Наука, 1969. 230 с.
6. Aziz M.A., Hashem M.A. Role of cyanobacteria in improving fertility of saline soil // *Pakistan Journal of Biological Sciences*. 2003. V. 6. No. 20. P. 1751–1752. doi: 10.3923/pjbs.2003.1751.1752
7. Кондакова Л.В., Сырчина Н.В., Пилип Л.В., Кондакова И.А. Влияние навозных стоков на почвенные фототрофные микроорганизмы // *Теоретическая и прикладная экология*. 2023. № 2. С. 190–197. doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-190-197
8. Исанова Г.Т., Абудувайли Ц., Мамутов Ж.У., Калдыбаев А.А., Сапаров Г.А., Базарбаева Т.А. Засоленные почвы и определение провинции соленакопления на территории Казахстана // *Аридные экосистемы*. 2017. № 4 (73). С. 35–43.
9. Сдобникова Н.В. Почвенно-альгологические исследования в степных, пустынно-степных и пустынных районах Казахстана // *Современное состояние и перспективы изучения почвенных водорослей в СССР: Труды межвузовской конференции*. Киров: Кировский с.-х. ин-т, 1967. Т. 20. Вып. 40. С. 103–108.
10. Gr S., Yadav R.K., Chatrath A., Gerard M., Tripathi K., Govindsamy V., Abraham G. Perspectives on the potential application of cyanobacteria in the alleviation of drought and salinity stress in crop plants // *Journal of Applied Phycology*. 2021. V. 33. P. 3761–3778. doi: 10.1007/s10811-021-02570-5

References

11. Rossi F., Li H., Liu Y., De Philippis R. Cyanobacterial inoculation (cyanobacterisation): Perspectives for the development of a standardized multifunctional technology for soil fertilization and desertification reversal // *Earth-Science Reviews*. 2017. V. 171. P. 28–43. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.05.006
12. Li H., Zhao Q., Huang H. Current states and challenges of salt-affected soil remediation by cyanobacteria // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 669. P. 258–272. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.104
13. Lai L., Feng J. Synergistic complementary effects of elemental sulfur and micro-algae on Saline-Alkali Soils // *Modern Concepts & Developments in Agronomy*. 2022. V. 11. No. 3. P. 1103–1105. doi: 10.31031/MCDA.2022.11.000762
14. Grim S.L., Voorhies A.A., Biddanda B.A., Jain S., Nold S.C., Green R., Dick G.J. Omics-inferred partitioning and expression of diverse biogeochemical functions in a low-O₂ cyanobacterial mat community // *mSystems*. 2021. V. 6. No. 6. P. e01042-21. doi: 10.1128/mSystems.01042-21
15. Canfora L., Vendramin E., Vittori Antisari L., Lo Papa G., Dazzi C., Benedetti A., Iavazzo P., Adamo P., Jungblut A.D., Pinzari F. Compartmentalization of gypsum and halite associated with cyanobacteria in saline soil crusts // *FEMS Microbiology Ecology*. 2016. V. 92. No. 6. Article No. fiw080. doi: 10.1093/femsec/fiw080
16. de Wit R., van den Ende F.P., van Gemerden H. Mathematical simulation of the interactions among cyanobacteria, purple sulfur bacteria and chemotrophic sulfur bacteria in microbial mat communities // *FEMS Microbiology Ecology*. 1995. V. 17. No. 2. P. 117–135. doi: 10.1016/0168-6496(95)00017-5
17. Stal L.J., Moezelaar R. Fermentation in cyanobacteria // *FEMS Microbiology Reviews*. 1997. V. 21. No. 2. P. 179–211. doi: 10.1111/j.1574-6976.1997.tb00350.x
18. Cohen Y., Gurevitz M. The cyanobacteria – ecology, physiology and molecular genetics / Eds. M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K.H. Schleifer, E. Stackebrandt. *The Prokaryotes*. New York, NY: Springer, 2006. P. 1074–1098. doi: 10.1007/0-387-30744-3_39
19. Сырчина Н.В., Скугорева С.Г., Кутявина Т.И. Рациональная утилизация серосодержащих отходов // *Теоретическая и прикладная экология*. 2023. № 4. С. 151–156. doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-151-156
20. Кондакова Л.В., Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я., Кондакова И.А. Трансформация почвенной альгоцианофлоры под влиянием фосфоритов Верхнекамских бедных // *Теоретическая и прикладная экология*. 2023. № 4. С. 184–190. doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-184-190
21. Kranzler C., Rudolf M., Keren N., Schleiff E. Iron in cyanobacteria // Eds. F. Chauvat, C. Cassier-Chauvat. *Advances in botanical research. Genomics of cyanobacteria*. Waltham: Academic Press, 2013. V. 65. P. 57–105. doi: 10.1016/B978-0-12-394313-2.00003-2
1. Sommer V., Mikhailyuk T., Glaser K., Karsten U. Uncovering unique green algae and cyanobacteria isolated from biocrusts in highly saline potash tailing pile habitats, using an integrative approach // *Microorganisms*. 2020. V. 8. No 11. Article No. 1667. doi: 10.3390/microorganisms8111667
2. Rocha F., Esteban Lucas-Borja M., Pereira P., Muñoz-Rojas M. Cyanobacteria as a nature-based biotechnological tool for restoring salt-affected soils // *Agronomy*. 2020. V. 10. Article No. 1321. doi: 10.3390/agronomy10091321
3. El Sheek M.M., Zayed M.A., Elmosseel F.K.A., Hassan R.A. Effect of cyanobacteria isolates on rice seeds germination in saline soil // *Baghdad Science Journal*. 2018. V. 15. No 1. P. 16–21. doi: 10.21423/bsj.2018.15.1.0016
4. Shtina E.F., Gollerbach M.M. *Soil algae ecology*. Moskva, 1976. 143 p. (in Russian).
5. Goryunova S.V., Rzhanova G.N., Orleanskiy V.K. *Blue-green algae (biochemistry, physiology, practical role)*. Moskva: Nauka, 1969. 230 p. (in Russian).
6. Aziz M.A., Hashem M.A. Role of cyanobacteria in improving fertility of saline soil // *Pakistan Journal of Biological Sciences*. 2003. V. 6. No. 20. P. 1751–1752. doi: 10.3923/pjbs.2003.1751.1752
7. Kondakova L.V., Syrchina N.V., Pilip L.V., Kondakova I.A. Manure runoff impact on soil phototrophic microorganisms // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 2. P. 190–197 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-190-197
8. Isanova G.T., Abuduvayli Ts., Mamutov Zh.U., Kaldybaev A.A., Saparov G.A., Bazarbaeva T.A. Saline soils and determination of salt accumulation provinces in Kazakhstan // *Aridnye ekosistemy*. 2017. No. 4 (73). P. 35–43 (in Russian).
9. Sdobnikova N.V. Soil-algological research in steppe, desert-steppe, and desert areas of Kazakhstan // *Current state and prospects for studying soil algae in the USSR: Trudy mezhvuzovskoy konferentsii*. Kirov: Kirovskiy s.-kh. in-t, 1967. V. 20. No. 40. 1967. P. 103–108 (in Russian).
10. Gr S., Yadav R.K., Chatrath A., Gerard M., Tripathi K., Govindsamy V., Abraham G. Perspectives on the potential application of cyanobacteria in the alleviation of drought and salinity stress in crop plants // *Journal of Applied Phycology*. 2021. V. 33. P. 3761–3778. doi: 10.1007/s10811-021-02570-5
11. Rossi F., Li H., Liu Y., De Philippis R. Cyanobacterial inoculation (cyanobacterisation): Perspectives for the development of a standardized multifunctional technology for soil fertilization and desertification reversal // *Earth-Science Reviews*. 2017. V. 171. P. 28–43. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.05.006
12. Li H., Zhao Q., Huang H. Current states and challenges of salt-affected soil remediation by cyanobacteria // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 669. P. 258–272. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.104

13. Lai L., Feng J. Synergistic complementary effects of elemental sulfur and micro-algae on Saline-Alkali Soils // *Modern Concepts & Developments in Agronomy*. 2022. V. 11. No. 3. P. 1103–1105. doi: 10.31031/MCDA.2022.11.000762
14. Grim S.L., Voorhies A.A., Biddanda B.A., Jain S., Nold S.C., Green R., Dick G.J. Omics-inferred partitioning and expression of diverse biogeochemical functions in a low-O₂ cyanobacterial mat community // *mSystems*. 2021. V. 6. No. 6. P. e01042-21. doi: 10.1128/mSystems.01042-21
15. Canfora L., Vendramin E., Vittori Antisari L., Lo Papa G., Dazzi C., Benedetti A., Iavazzo P., Adamo P., Jungblut A.D., Pinzari F. Compartmentalization of gypsum and halite associated with cyanobacteria in saline soil crusts // *FEMS Microbiology Ecology*. 2016. V. 92. No. 6. Article No. fiw080. doi: 10.1093/femsec/fiw080
16. de Wit R., van den Ende F.P., van Gemerden H. Mathematical simulation of the interactions among cyanobacteria, purple sulfur bacteria and chemotrophic sulfur bacteria in microbial mat communities // *FEMS Microbiology Ecology*. 1995. V. 17. No. 2. P. 117–135. doi: 10.1016/0168-6496(95)00017-5
17. Stal L.J., Moezelaar R. Fermentation in cyanobacteria // *FEMS Microbiology Reviews*. 1997. V. 21. No. 2. P. 179–211. doi: 10.1111/j.1574-6976.1997.tb00350.x
18. Cohen Y., Gurevitz M. The cyanobacteria – ecology, physiology and molecular genetics // Eds. M. Dworkin, S. Falkow, E. Rosenberg, K.H. Schleifer, E. Stackebrandt. *The Prokaryotes*. New York, NY: Springer, 2006. P. 1074–1098. doi: 10.1007/0-387-30744-3_39
19. Syrchina N.V., Skugoreva S.G., Kut'yavina T.I. Rational disposal of sulphur containing waste // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 4. P. 151–156 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-151-156
20. Kondakova L.V., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Kondakova I.A. Transformation of soil algaecyanoflora under the influence of Verkhnekamsk lean rock phosphorites // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 4. P. 184–190 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-184-190
21. Kranzler C., Rudolf M., Keren N., Schleiff E. Iron in cyanobacteria // Eds. F. Chauvat, C. Cassier-Chauvat. *Advances in botanical research. Genomics of cyanobacteria*. Waltham: Academic Press, 2013. V. 65. P. 57–105. doi: 10.1016/B978-0-12-394313-2.00003-2