

Трансформация почвенной альгоцианофлоры под влиянием фосфоритов Верхнекамских бедных

© 2023. Л. В. Кондакова^{1,2}, д. б. н., профессор, с. н. с.,
Н. В. Сырчина², к. х. н., доцент, с. н. с.,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
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

Изучена реакция почвенной альгоцианофлоры на фосфориты Верхнекамские бедные (ФВБ), предназначенные для использования в качестве удобрений. Наиболее чувствительной группой фототрофных микроорганизмов по отношению к ФВБ оказались цианобактерии (ЦБ), отзывчивые на фосфор. По сравнению с контролем их видовое разнообразие в варианте с добавкой ФВБ 0,5 г/кг увеличилось в полтора раза. Внесение ФВБ привело к увеличению и количественных показателей ЦБ в почве. Численность клеток ЦБ возросла в вариантах: 0,2 г/кг – на 30%; 0,5 г/кг – на 51,7%; 1,0 г/кг – на 57,8%. Общая численность микрофототрофов увеличилась со 174 тыс. кл./г почвы (контроль) до 222 тыс. кл./г почвы (0,5 г/кг).

Ключевые слова: почвенная альгоцианофлора, агрозёмы, глаукониты, фосфориты Верхнекамские бедные.

Transformation of soil algocyanoflora under the influence of Verkhnekamsk lean rock phosphorites

© 2023. L. V. Kondakova^{1,2} ORCID: 0000-0002-2190-686X, N. V. Syrchina² ORCID: 0000-0001-8049-6760,
T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047, 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 Sciences,

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

²Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: ecolab2@gmail.com

The research deals with soil algocyanoflora reaction to Verkhnekamsk lean rock phosphorites which are used as natural fertilizers. Cyanobacteria turned out to be the most sensitive to Verkhnekamsk lean rock phosphorites; they are responsive to phosphorus and to reduction of soil acidity. As compared with the control, after adding 0.5 g/kg Verkhnekamsk lean rock phosphorites, their species diversity in the variant increased 1.5 times. Introduction of Verkhnekamsk lean rock phosphorites caused increase in cyanobacteria quantity as well. The number of cyanobacteria cells increased in the variants: 0.2 g/kg by 30%, 0.5 g/kg by 51.7%, 1.0 g/kg by 57.8%. The overall number of micophototrophic cells increased from 174.0±14.3 thousand cells per 1 g of soil to 222.3±15.8 thousand cells per 1 g of soil (0.5 g/kg).

Keywords: soil algocyanoflora, agrozeams, glauconites, Verkhnekamsk lean rock phosphorites.

К числу важнейших экологических проблем современного сельскохозяйственного производства относится ухудшение состояния обрабатываемых земель и снижение почвенного плодородия. Ориентация на интенсивные

системы земледелия приводит к ухудшению структуры почвы, нарушению баланса питательных элементов, накоплению в пашне токсичных соединений, важнейшими источниками которых являются пестициды, удобрения

ния, искусственные почвенные мелиоранты (синтетический карбонат кальция, фосфогипс, хлорид кальция и др.) [1]. В результате антропогенного воздействия изменяются не только физические и химические характеристики почв, но и состав почвенной микробиоты, играющей ключевую роль в создании почвенного плодородия, способности почв к самоочищению и реализации биологических механизмов супрессивности [2]. По имеющимся оценкам, в 1 г почвы может содержаться более 1 млрд микроорганизмов (МО), включая бактерии (в том числе цианобактерии (ЦБ) и актиномицеты), грибы, водоросли, простейшие. Видовое разнообразие населяющих почву МО достигает 1 000 – 1 000 000 видов в 1 г почвы [3, 4]. Между отдельными почвенными МО складываются многоплановые консортивные связи и отношения, благодаря которым формируются микробоценозы. Устойчивое и продуктивное функционирование подобных сообществ во многом определяется наличием и разнообразием почвенных фотоавтотрофов, важнейшими представителями которых являются микроводоросли (МВ) и ЦБ [5, 6].

Почвенная альгоцианофлора принимает активное участие в таких глобальных экологических процессах, как фотосинтез, фиксация атмосферного азота, почвообразование, круговорот фосфора, благодаря чему формируется среда обитания для других организмов. Эукариотические водоросли и ЦБ могут не только обогащать почву биодоступными питательными веществами, но и повышать плодородие за счёт синтеза широкого спектра полисахаридов, антибиотиков, фитогормонов (абсцизовая кислота, цитокинин, гиббереллины, этилен), а также других метаболитов, способствующих росту растений [7–9]. Исследования последних лет показывают, что культуры ЦБ и МВ могут найти применение в качестве эффективных биоудобрений [10], при этом оптимальные условия для развития ЦБ создаются в нейтральных или слабо щелочных почвах [11].

Активное антропогенное воздействие на почвы приводит к глубокой трансформации естественных микробосообществ и нарушению баланса между различными группами автотрофных и гетеротрофных МО. Реакция МВ и ЦБ на химические вещества в окружающей среде может варьироваться от гибели до появления «цветения» почвы. Длительные периоды интенсивного применения химических удобрений вызывают сокращение разнообразия микротофотрофов и их численности [2, 12], что неизбежно отражается на плодородии

и здоровье почв. Определённой альтернативой некоторым химическим удобрениям могут служить природные минералы (фосфориты, глаукониты, цеолиты, бентониты), внесение которых приводит к восполнению дефицита элементов питания, накоплению органического вещества, улучшению структуры и биологических свойств почвы [13]. Однако вопрос об их влиянии на почвенную альгоцианофлору остаётся открытым [14]. Особенно мало сведений о сочетанном воздействии на альгоцианофлору природных материалов, содержащих несколько различных минералов. К таким материалам можно отнести глауконитсодержащие хвосты обогащения фосфоритов, основными компонентами которых являются глауконит и фосфориты мелких фракций. Известно, что почвенная альгоцианофлора весьма отзывчива на фосфорные удобрения [15]. О влиянии глауконитов на обитающие в почве ЦБ и МВ практически ничего не известно.

Цель настоящей работы состояла в изучении основных направлений трансформации почвенной альгоцианофлоры под влиянием разных норм внесения глауконитсодержащих хвостов обогащения фосфоритов (фосфоритов Верхнекамских бедных), предназначенных для использования в качестве почвенных мелиорантов.

Материалы и методы

Для проведения исследований использовали фосфориты Верхнекамские бедные (ФВБ), получаемые из хвостов обогащения фосфоритной руды (ХОФ) Вятско-Камского месторождения в соответствии с ТУ 08.91.19-002-85629294-2020, и предназначенные для использования в качестве почвенного мелиоранта, а также для включения в состав органоминеральных удобрений и почвогрунтов. Продукт представляет собой однородный мелкозернистый сыпучий материал зеленовато-серого цвета. Основными компонентами ХОФ, используемых для получения ФВБ являются глаукониты, фосфориты мелких фракций, кварц, известковые и глинистые материалы. Различные минералы образуют между собой трудноразделимые сростки, что затрудняет разделение ХОФ на отдельные компоненты. Содержание глауконитов в соответствующем материале может достигать 70% [16]. Возможность и перспективность использования ХОФ в качестве почвенного мелиоранта или компонента удобрений обоснована в публикациях [17, 18].

Химический анализ образцов ФВБ, используемых для проведения исследований, выполняли атомно-эмиссионным и масс-спектральными методами. Согласно полученным результатам, массовая доля определяемых компонентов в образцах ФВБ составила (в %): P_2O_5 – 6,1; K_2O – 3,4; S – 1,2; CaO – 9,4; MgO – 1,7. Содержание токсичных элементов (мг/кг): Cd – 0,20; Pb – 14,2; As – 37,6; Hg < 0,005.

В качестве субстрата для оценки различных норм внесения ФВБ на альгоцианофлору использовали образцы агрозёма с содержанием гумуса 5,5%; P_2O_5 – 120 мг/кг; K_2O – 115 мг/кг; pH_{KCl} 6,7; сумма поглощённых оснований – 22,4 ммоль/100 г. Добавки ФВБ вносили в воздушно-сухой субстрат согласно вариантам эксперимента и перемешивали.

Варианты эксперимента: 1) агрозём без добавок (контроль); 2) агрозём + ФВБ (0,2 г/кг); 3) агрозём + ФВБ (0,5 г/кг); 4) агрозём + ФВБ (1,0 г/кг).

Видовой состав развивающихся в субстрате фототрофов выявляли методами постановки водных и чашечных культур со «стёклами обрастания» [19]. Инкубация культур проходила при дневном освещении. Определение водорослей и ЦБ проводили с использованием отечественных и зарубежных определителей.

Все экспериментальные исследования выполняли в лабораторных условиях в трёхкратной повторности. Для статистической обработки результатов применяли стандартные методы с использованием встроенного пакета программ Excel, STATISTICA 10.

Результаты и обсуждение

В вариантах эксперимента по изучению реакции почвенных фототрофных МО на разные дозы удобрения выявлено 38 видов микрфототрофов, в том числе: Cyanobacteria – 14; Chlorophyta – 10; Xanthophyta – 4; Eustigmatophyta – 2; Bacillariophyta – 7; Euglenophyta – 1. Наиболее богатым в видовом отношении таксоном являлись ЦБ – 36,8% выявленного видового разнообразия. Доля представителей Chlorophyta составляла 26,4%, Bacillariophyta – 18,5%. Альгофлора других таксонов была представлена небольшим числом видов. Результаты экспериментальных исследований, характеризующие влияние добавок ФВБ на видовое разнообразие почвенных фототрофных МО, представлены в таблице 1.

Небольшие различия между разными вариантами проявились в видовом составе ЦБ.

Ряд видов ЦБ был отмечен только в вариантах с более высокой добавкой ФВБ (0,5 г/кг и 1,0 г/кг): *Anabaena cylindrica*, *Nostoc punctiforme*, *Leptolyngbya fragilis*, *Phormidium formosum*. Наиболее значительное влияние ФВБ на видовое разнообразие микрфототрофов было выявлено в варианте 3 (добавка ФВБ 0,5 г/кг). В соответствующем варианте число выявленных видов увеличилось на 22%.

В таблице 2 приведены данные о влиянии добавок ФВБ на видовое разнообразие выявленных таксонов.

Анализ видового разнообразия микрфототрофов по таксономическим группам показал влияние нормы вносимых ФВБ на реализацию их видового потенциала. Наиболее чувствительной группой по отношению к ФВБ оказались ЦБ, отзывчивые на фосфор и низкую кислотность почвы (в опыте pH_{KCl} 6,7). По сравнению с контролем, их видовое разнообразие в варианте 3 (добавка ФВБ 0,5 г/кг) увеличилась в полтора раза (8 и 12 видов соответственно). Роль ЦБ в формировании почвенного плодородия трудно переоценить. Биологическая продуктивность почв в основном лимитируется содержанием в них связанного азота. Цианобактерии в процессе жизнедеятельности влияют на азотный режим почвы и её плодородие в результате способности к азотфиксации. Они принимают участие в обогащении почвы азотом, активизируют деятельность гетеротрофных азотфиксаторов, служат источником органического вещества как энергетического материала для гетеротрофных МО. В процессе жизнедеятельности ЦБ синтезируют и выделяют в окружающую среду вещества различной химической природы и биологической активности. Увеличение видового разнообразия ЦБ в почве под влиянием ФВБ можно считать одним из факторов повышения почвенного плодородия.

Состав доминирующих видов, выявленных в разных вариантах эксперимента, сохраняет большое сходство (табл. 3). Однако, если в контрольном варианте и в варианте с минимальной добавкой ФВБ (0,2 г/кг) на первое место среди доминантов выходят диатомовые водоросли, то в вариантах с более высокими добавками ФВБ (0,5 г/кг и 1,0 г/кг) – отзывчивые на фосфор ЦБ.

Для оценки сходства результатов, полученных в различных вариантах эксперимента, использовали коэффициент Жаккара (табл. 4).

Внесение ФВБ привело к изменению состава почвенных фототрофных МО во всех вариантах относительно контроля.

Таблица 1 / Table 1

Влияние добавок фосфоритов Верхнекамских бедных на видовое разнообразие почвенных фототрофных микроорганизмов / Effect of different additives of Vekhnekamsk lean rock phosphorites on species diversity of soil phototrophic microorganisms

№ п/п	Таксоны, виды / Taxons, species	Вариант / Variant			
		1	2	3	4
Cyanobacteria					
1	<i>Anabaena</i> sp.	+	+	+	-
2	<i>Anabaena cylindrica</i> Lemm.	-	-	-	+
3	<i>Cylindrospermum licheniforme</i> (Bory) Kütz.	+	+	+	+
4	<i>Leptolyngbya angustissima</i> (W. et G.S. West) Anagn. et Kom.	+	+	+	+
5	<i>Leptolyngbya foveolarum</i> (Rabenh. et Gom.) Anagn. et Kom.	+	+	+	-
6	<i>Leptolyngbya frigida</i> (Fritsch) Anagn. et Kom.	+	+	+	+
7	<i>Leptolyngbya fragilis</i> (Gom.) Anagn. et Kom.	-	-	+	+
8	<i>Leptolyngbya hollerbachiana</i> (Elenk.) Anagn. et Kom.	+	+	-	-
9	<i>Nostoc paludosum</i> Kütz.	+	-	+	+
10	<i>Nostoc punctiforme</i> (Kütz.) Hariot	-	-	+	-
11	<i>Phormidium autumnale</i> (Ag.) Gom.	+	+	+	+
12	<i>Phormidium formosum</i> (Bory ex Gom.) Anagn. et Kom.	-	-	+	+
13	<i>Phormidium tenue</i> (Ag. ex Gom.) Anagn. et Kom.	-	+	+	-
14	<i>Pseudanabaena catenata</i> Lauterb.	-	-	+	+
Всего / Total		8	8	12	9
Chlorophyta					
15	<i>Chlamydomonas gloeogama</i> Korsch. in Pasch. var. <i>gloeogama</i>	+	+	+	+
16	<i>Chlamydomonas gelatinosa</i> Korsch. in Pascher	-	+	+	+
17	<i>Chlorella minutissima</i> Fott et Novakova	-	+	+	-
18	<i>Chlorella vulgaris</i> Beijer.	+	+	+	+
19	<i>Chlorococcum infusionum</i> (Schrank) Menegh.	+	+	+	+
20	<i>Macrochloris dissecta</i> Korsch.	-	-	+	+
21	<i>Palmella miniata</i> Leibl.	+	+	-	-
22	<i>Pseudococcomyxa simplex</i> (Mainx) Fott	+	+	+	-
23	<i>Tetracystis aggregata</i> Brown et Bold	+	-	+	-
24	<i>Chlorophyta</i> sp.	+	+	+	+
Всего / Total		7	7	9	6
Xanthophyta					
25	<i>Pleurochloris pyrenoidosa</i> Pasch.	+	-	-	-
26	<i>Pleurochloris commutata</i> Pasch.	+	+	+	+
27	<i>Xanthonema bristolianum</i> (Pasch.) Silva	+	+	+	+
28	<i>Xanthonema exile</i> (Klebs) Silva	-	-	+	-
Всего / Total		3	2	3	2
Eustigmatophyta					
29	<i>Eustigmatos magnus</i> (B. Petersen) Hibberd	+	-	+	-
30	<i>Vischeria helvetica</i> (Vischer et Pasch.) Hibberd	-	-	-	+
Всего / Total		1	0	1	1
Bacillariophyta					
31	<i>Amphora ovalis</i> Kütz.	+	+	+	+
32	<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehr.) Grun. in Cleve et Grun.	+	+	+	+
33	<i>Luticola mutica</i> (Kütz.) Mann in Round et al.	+	+	+	+
34	<i>Navicula atomus</i> (Kütz.) Grun.	+	-	+	-
35	<i>Navicula pelliculosa</i> (Breb.) Hilse	+	+	+	+
36	<i>Nitzschia palea</i> (Kütz.) W. Smith	+	+	+	+
37	<i>Pinnularia intermedia</i> Lagerst.	+	+	+	+
Всего / Total		7	6	7	6
Euglenophyta					
38	<i>Euglena mutabilis</i> Schmitz	+	+	+	+
Всего / Total		1	1	1	1
Итого / Total amount		27	24	33	25

Примечание. Варианты: 1 – контроль; 2 – 0,2 г/кг; 3 – 0,5 г/кг; 4 – 1 г/кг почвы; «+» – наличие вида; «-» – отсутствие вида.
 Note. Variants: 1 – control; 2 – 0.2 g/kg; 3 – 0.5 g/kg; 4 – 1 g/kg soil; “+” – presence of the species; “-” – absence of the species.

Таблица 2 / Table 2

Влияние добавок фосфоритов Верхнекамских бедных на видовое разнообразие выявленных таксонов
Effect of different additives of Vekhnekamsk lean rock phosphorites on species diversity of the taxons registered

Вариант Variant	Cуано- bacteria		Chloro- phyta		Xantho- phyta		Eustig- matophyta		Bacilla- riophyta		Eugleno- phyta		Всего Total
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
1	8	29,6	7	25,9	3	11,2	1	3,7	7	25,9	1	3,7	27
2	8	33,3	7	29,2	2	8,3	0	0	6	25,0	1	4,2	24
3	12	36,4	9	27,3	3	9,1	1	3,0	7	21,2	1	3,0	33
4	9	37,5	5	20,8	2	8,3	1	4,2	6	25,0	1	4,2	23
Всего Total	44	36,8	40	26,4	4	10,5	2	5,2	7	18,5	4	2,6	38

Примечание: 1 – число выявленных видов в варианте; 2 – процент.
Note: 1 – the number of species found in the variant; 2 – percentage.

Таблица 3 / Table 3

Доминирующие виды микрофототрофов в вариантах с различными добавками
фосфоритов Верхнекамских бедных / Dominant species in the variants with different
additives of Vekhnekamsk lean rock phosphorites

Вариант / Variant	Доминирующие виды микрофототрофов / Dominant species of microphototrophs
Контроль Control	<i>Nitzschia palea</i> , <i>Hantzschia amphioxys</i> , <i>Navicula pelliculosa</i> , <i>Phormidium autumnale</i> , <i>Leptolyngbya foveolarum</i> (диатомовые водоросли и цианобактерии / diatoms and cyanobacteria)
0,2 г/кг 0.2 g/kg	<i>Nitzschia palea</i> , <i>Luticola mutica</i> , <i>Leptolyngbya frigida</i> (диатомовые водоросли и цианобактерии / diatoms and cyanobacteria)
0,5 г/кг 0.5 g/kg	<i>Phormidium autumnale</i> , <i>Leptolyngbya foveolarum</i> , <i>Nitzschia palea</i> , <i>Navicula pelliculosa</i> (цианобактерии и диатомовые водоросли / cyanobacteria and diatoms)
1,0 г/кг 1.0 g/kg	<i>Nostoc paludosum</i> , <i>Leptolyngbya angustissima</i> , <i>L. foveolarum</i> , <i>Luticola mutica</i> , <i>Nitzschia palea</i> , <i>Navicula pelliculosa</i> (цианобактерии и диатомовые водоросли / cyanobacteria and diatoms)

Таблица 4 / Table 4

Коэффициенты Жаккара (%) в вариантах с различными добавками фосфоритов верхнекамских бедных
Jaccard coefficient (%) in variants with different additives of Vekhnekamsk lean rock phosphorites

Варианты / Variants	1	2	3	4
Контроль / Control		75,8	66,6	56,2
0,2 г/кг / 0.2 g/kg			95,8	62,1
0,5 г/кг / 0.5 g/kg				64,7
1,0 г/кг / 1.0 g/kg				

Таблица 5 / Table 5

Количественные показатели альгоцианофлоры (тыс. кл. /г почвы) в вариантах с различными
добавками фосфоритов верхнекамских бедных / Quantitative index of algocyanoflora (thousand cells
per 1 g soil) in variants with different additives of Vekhnekamsk lean rock phosphorites

Варианты Variants	Cyanobacteria	Chlorophyta+ Xanthophyta	Bacillariophyta	Всего / Total
Контроль / Control	109,7±7,1	34,0±2,8	30,3±4,3	174,0±14,3
0,2 г/кг / 0.2 g/kg	142,7±17,1	35,9±4,3	27,4±4,3	206,0±25,7
0,5 г/кг / 0.5 g/kg	166,4±8,6	36,9±2,8	18,9±4,3	222,3±15,8
1,0 г/кг / 1.0 g/kg	173,1±28,8	38,8±4,3	28,4±2,8	241,9±35,9

Отмечено высокое сходство вариантов с внесением ФВБ в дозах 0,2 г/кг и 0,5 г/кг (коэффициент Жаккара 95,8%). В варианте с более высокой добавкой ФВБ (1,0 г/кг) коэффициент сходства был значительно ниже – 56,2% (табл. 4).

Важное значение в оценке трансформации экологического состояния почвенной среды под влиянием воздействующего фактора имеют количественные показатели альгоцианофлоры (табл. 5).

Количественный учёт альгоцианофлоры в вариантах эксперимента показал положительную реакцию ЦБ на вносимое удобрение. С увеличением добавки ФВБ численность клеток ЦБ возросла в варианте 0,2 г/кг на 30%, варианте 0,5 г/кг – на 51,7%, варианте 1,0 г/кг – на 57,8%. Общая численность клеток микрофототрофов увеличилась с 174,0±14,3 тыс. кл./ г почвы (в контроле) до 222,3±15,8 тыс. кл./ г почвы в опытном варианте 0,5 г/кг.

Заключение

Почвенные фототрофные МО проявляют выраженную чувствительность к нормам вносимых ФВБ. Наибольший эффект был получен при внесении ФВБ в дозе 0,5 г на 1 кг почвы (примерно 1,0–1,5 т/га).

Наибольшую чувствительность к добавке ФВБ проявили ЦБ, отзывчивые на фосфор. По сравнению с контролем, их видовое разнообразие в варианте 3 (добавка ФВБ 0,5 г/кг) увеличилось в полтора раза (8 и 12 видов соответственно).

Внесение в субстрат (агрозём) ФВБ изменяет соотношение доминирующих видов. Доминантами сообщества становятся ЦБ. В контрольном варианте доминирующей группой являются диатомовые водоросли.

Коэффициент Жаккара показал высокое сходство альгоцианофлоры вариантов с внесением ФВБ в дозах 0,2 и 0,5 г/кг – 95,8%. В варианте с более высокой добавкой (1 г/кг) данный коэффициент составил 56,2%.

Внесение ФВБ оказывает влияние на количественные показатели клеток микрофототрофов. С увеличением добавки ФВБ численность клеток ЦБ возросла в варианте 0,2 г/кг на 30%, варианте 0,5 г/кг – на 51,7%, варианте 1,0 г/кг – на 57,8%. Общая численность клеток микрофототрофов увеличилась с 174,0±14,3 тыс. кл./ г почвы (контроль) до 222,3±15,8 тыс. кл./ г почвы (0,5 г/кг). Результаты проведённого исследования могут быть использованы при расчёте норм внесения ФВБ в почву в качестве удобрения и мелиоранта.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 1220401000325.

References

1. Shchapova L.N., Purtova L.N., Kiseleva I.V. Influence of surface treatment and fertilization level on microflora of agrozems and humus accumulation in the cultivation of perennial grasses // Vestnik DVO RAN. 2019. No. 1 (203). P. 44–50 (in Russian). doi: 10.25808/08697698.2019.203.1.005
2. Abinandan S., Subashchandrabose S.R., Venkateswarlu K., Megharaj M. Soil microalgae and cyanobacteria: the biotechnological potential in the maintenance of soil fertility and health // Critical reviews in biotechnology. 2019. V. 39. No. 8. P. 981–998. doi: 10.1080/07388551.2019.1654972
3. Johns C. Living soils: the role of microorganisms in soil health // Future Directions International. 2017. V. 1. No. 7 [Internet resource] <https://apo.org.au/sites/default/files/resource-files/2017-06/apo-nid96931.pdf> (Accessed: 21.11.2023).
4. Dequiedt S., Saby N.P.A., Lelievre M., Jolivet C., Thioulouse J., Toutain B., Arrouays D., Bispo A., Lemanceau P., Ranjard L. Biogeographical patterns of soil molecular microbial biomass as influenced by soil characteristics and management // Global Ecology and Biogeography. 2011. V. 20. No. 4. P. 641–652. doi:10.1111/j.1466-8238.2010.00628.x
5. Chamizo S., Cant n Y., Rodriguez-Caballero E., Domingo F. Biocrusts positively affect the soil water balance in semiarid ecosystems // Ecohydrology. 2016. V. 9. No. 7. P. 1208–1221. doi: 10.1002/eco.1719
6. Samolov E., Baumann K., B del B., Jung P., Leinweber P., Mikhailyuk T., Karsten U., Glaser K. Biodiversity of algae and cyanobacteria in biological soil crusts collected along a climatic gradient in Chile using an integrative approach // Microorganisms. 2020. V. 8. No. 7. Article No. 1047. doi: 10.3390/microorganisms8071047
7. Ramakrishnan B., Maddela N.R., Venkateswarlu K., Megharaj M. Potential of microalgae and cyanobacteria in improving soil health and agricultural productivity – a critical view // Environmental Science: Advances. 2023. No. 2. P. 586–611. doi: 10.1039/D2VA00158F
8. Alvarez A.L., Weyers S.L., Goemann H.M., Peyton B.M., Gardner R.D. Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture // Algal Research. 2021. V. 54. Article No. 102200. doi: 10.1016/j.algal.2021.102200
9. Kuraganti G., Edla S., Pallaval V.B. Cyanobacteria as biofertilizers: current research, commercial aspects, and future challenges // Advances in Plant Microbi-

ome and Sustainable Agriculture. Microorganisms for Sustainability / Eds. A. Yadav, A. Rastegari, N. Yadav, D. Kour. Singapore: Springer, 2020. V. 20. P. 259–278. doi: 10.1007/978-981-15-3204-7_11

10. Guo S., Wang P., Wang X., Zou M., Liu C., Hao J. Microalgae as biofertilizer in modern agriculture // Microalgae biotechnology for food, health and high value products / Eds. M.A. Alam, J.L. Xu, Z. Wang. Singapore: Springer, 2020. P. 397–411. doi: 10.1007/978-981-15-0169-2_12

11. Shtina E.A. Soil algae as ecological indicators // Botanicheskiy Zhurnal. 1990. V. 75. No. 4. P. 341–453 (in Russian).

12. Domracheva L.I. Soil “blooming” and laws of its development. Syktyvkar, 2005. 336 p. (in Russian).

13. Pyndak V.I., Novikov A.E. Natural ameliorants on the basis of silica and alumina // Izvestiya Nizhnevolskogo agrouniversitetskogo kompleksa nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2015. No. 2 (38). P. 73–76 (in Russian).

14. 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

15. Markou G., Vandamme D., Muylaert K. Microalgal and cyanobacterial cultivation: The supply of nutrients // Water research. 2014. V. 65. P. 186–202. doi: 10.1016/j.watres.2014.07.025

16. Syrchina N.V., Bogatyryova N.N., Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya. Tailings of enrichment of phosphorites of the Vyatka-Kama deposit as secondary material resources for the production of natural fertilizers // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 2. P. 107–114 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-107-114

17. Terentyev Yu.N., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya. Natural sulfur fertilizer with activated peat and glauconitic eifel // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 3. P. 134–141 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-134-141

18. Syrchina N.V., Asikhmina T.Ya., Bogatyryova N.N., Kantor G.Ya. Prospects for using phosphate rock enrichment tailings as fertilizers for organic farming // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 160–166 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-160-166

19. Shtina E.A., Gollerbach M.M., Ecology of soil algae. Moskva: Nauka, 1976. 144 p. (in Russian).