

Влияние хвостов обогащения фосфоритов, используемых в качестве удобрения, на почвенные альго-цианобактериальные сообщества

© 2021. 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,
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: nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Проведено изучение реакции фототрофных микроорганизмов пахотных дерново-подзолистых почв на внесение хвостов обогащения фосфоритов в качестве удобрения. Отмечен положительный отклик почвенных микрофототрофов, проявившийся в увеличении числа видов в опытных вариантах по сравнению с контролем. На кислой (рН 4,3) почве в контрольном варианте было отмечено 13 видов микрофототрофов, в опытном – 16. Положительную реакцию к эфелю проявили цианобактерии, число их видов увеличилось в два раза, возросло число видов зелёных и жёлтозелёных водорослей. На почве (рН 5,5) внесение эфеля способствовало увеличению видового разнообразия зелёных водорослей, чувствительных к азоту. Фракции эфеля оказывают влияние на динамику реализации видового потенциала альгоцианофлоры. За месяц экспозиции почвенных культур (рН 5,5) в контрольном варианте выявлено 17 видов микрофототрофов, в опыте с внесением натурального эфеля – 21 вид, молотого эфеля – 27.

Хвосты обогащения фосфоритов Вятско-Камского фосфоритоносного бассейна имеют ценный химический состав (фосфориты, глауконит, кварц, известковые и глинистые минералы), характеризуются низким содержанием экотоксичных элементов и представляют собой ценное удобрение для сельскохозяйственных культур. Вовлечение в сельскохозяйственный оборот новых источников биогенных веществ, не находящихся в настоящее время практического применения и являющихся отходами другого производства, требует глубокого изучения.

Ключевые слова: техногенные отходы, хвосты обогащения фосфоритов, альгофлора, водоросли, цианобактерии.

The effect of enrichment tailings of phosphorites as fertilizers on soil algo-cyanobacterial communities

© 2021. 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

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: nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com

We studied the reaction of phototrophic microorganisms of agricultural sod-podzol soil to input of fine-grained enrichment tailings of phosphorites used as a fertilizer. Soil microphototrophs reacted positively, as in the experimental variants the number of their species increased, as compared with the control variant. In acidic soil (pH 4.3) in the control variant we found 13 species of microphototrophs, in the experimental variant – 16 species. Cyanobacteria had a positive reaction to fine-grained enrichment tailings of phosphorites, as the number of their species got twice as many, and the number of green and yellow-green alga species increased. In soil (pH 5.5) the input of fine-grained enrichment tailings of phosphorites caused an increase of diversity of green alga species sensitive to nitrogen. Fractions of fine-grained enrichment tailings influence the dynamics of algocyanoflora species potential. For a month of soil cultures exposition (pH 5.5) we found 17 species of microphototrophs in the control variant, 21 species in the experiment with coarse fraction, and 27 species in the experiment with fine fraction.

Enrichment tailings of phosphorites of the Vyatka-Kama phosphorite basin have a chemical composition of value (phosphorites, glauconite, quartz, lime and clay minerals), the content of ecotoxic elements in them is low and they can be used as a fertilizer in agriculture. Agricultural use of new sources of biogenic substances which are actually the waste of other industries and which are now impracticable requires in-depth study.

Keywords: technogenic waste, phosphate rock enrichment tailings, algaeflora, algae, cyanobacteria.

Фосфоритные руды относятся к невозобновляемым природным ресурсам, основным направлением практического использования которых является производство фосфорных удобрений. Особую ценность для переработки представляет руда, характеризующаяся не только высоким содержанием фосфора, но и низким содержанием экотоксичных элементов (в частности, кадмия), представляющих угрозу для окружающей среды. Мировые запасы таких фосфоритов весьма ограничены, что обуславливает необходимость внедрения ресурсосберегающих технологий, позволяющих использовать ценные компоненты руды с максимальной эффективностью.

Низкое содержание Cd характерно для желваковых фосфоритов Вятско-Камского фосфоритоносного бассейна. В настоящее время добыча руды на месторождении не ведётся, однако в период его активного освоения на территории хвостохранилища было накоплено более 20 млн т отходов – хвостов обогащения, которые, несмотря на ценный состав, до настоящего времени не находят практического применения. Технология обогащения включала промывку руды водой и грохочение. Реагентные методы на добывающем и перерабатывающем руду предприятии (Верхнекамском фосфоритном руднике) практически не использовались (за исключением непродолжительного периода испытаний технологии флотационного обогащения). В хвостохранилище в основном сбрасывалась незагрязнённая химическими реагентами, вмещающая фосфориты породы, включающая глауконит (до 60–70%), фосфориты мелких фракций, кварц, известковые и глинистые материалы [1]. В результате проведённых исследований было установлено, что доля P_2O_5 в отходе достигает 6–9%, K_2O – 3–4%, при этом содержание Cd не превышает 0,3 мг/кг [2]. Опубликованные данные свидетельствуют о том, что хвосты обогащения (эфеля) Верхнекамского фосфоритного рудника могут найти применение в качестве натуральных фосфорно-калийных удобрений или в качестве компонентов сложных удобрений. Особую ценность в этом плане представляют содержащиеся в эфелях глаукониты и фосфатные материалы [3].

Согласно данным [4], внесение глауконитов способствует не только обогащению почвы калием и фосфором, но и обуславливает увеличение в ней аммонийного и снижение нитратного азота относительно контроля. Внесение в почву 30 и 60 кг/га глауконитового концентрата оказало стимулирующее воздействие на всхожесть, энергию прорастания, высоту и зелёную массу растений овса голозёрного. В полевом опыте внесение в почву глауконита в дозе 0,3 т/га обеспечило увеличение урожайности зерна овса на 18%.

Альго-цианобактериальные сообщества являются составной частью любой наземной экосистемы. Данные сообщества в каждой почве относительно стабильны по флористическому составу, доминирующим и специфическим видам [7]. Минеральные удобрения влияют на жизнь почвы через изменение активной реакции почвенного раствора и улучшение условий питания. Реакция почвенных микроразнообразия (водорослей и цианобактерий) на внесение минеральных и органических удобрений активно изучалась в 60–70-е годы XX века в Кировском государственном сельскохозяйственном институте [7]. Новый подход к биоиндикации состояния среды пахотных дерново-подзолистых почв с помощью фототрофных микроорганизмов состоял в исследованиях фототрофных группировок «цветения» почвы [10]. Привнесение в экосистему дополнительных биогенных элементов мгновенно сказывается на количественных и качественных характеристиках сообществ микроразнообразия, влияет на их групповую структуру и видовое разнообразие. Размножение и процветание группировок цианобактерий (ЦБ) стимулирует внесение фосфорно-калийных удобрений. Длительное применение только минеральных удобрений при высоких дозах внесения азота приводит к упрощению структуры сообщества за счёт флористической неполноценности, связанной с выпадением цианобактериального компонента микрофлоры. Многолетний мониторинг пойменных почв в зоне влияния завода минеральных удобрений (г. Кирово-Чепецк) выявил при достаточно богатом видовом разнообразии альгоцианофлоры слабое развитие азотфиксирующих видов [11].

Органическое вещество водорослей и ЦБ быстро включается в трофические цепи экосистемы, участвует в биологическом круговороте веществ. Биомасса водорослей может обновляться в течение нескольких дней, при этом общая продукция может превышать биомассу в несколько раз и достигать нескольких центнеров живой массы [8]. Азотфиксирующие ЦБ вовлекают в биологический круговорот атмосферный азот. За счёт азотфиксации для почв умеренной зоны накопление азота составляет до 26 кг/га в год, на пахотных дерново-подзолистых почвах под озимой рожью и многолетними злаковыми травами – до 11 кг/га [9].

Использование методов альгоиндикации показало, что реакцией на изменение условий среды является изменение видового состава и численности микрорототрофов [10].

Литературных данных о влиянии на почвенную альгоцианофлору глауконитсодержащих хвостов обогащения не найдено.

Цель настоящей работы состояла в изучении влияния хвостов обогащения фосфоритной руды, используемых в качестве удобрения, на почвенные альго-цианобактериальные сообщества.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований использовались образцы эфеля, отобранные на тер-

ритории хвостохранилища Верхнекамского фосфоритного рудника в сентябре 2020 г. Химический анализ отобранных образцов проводился атомно-эмиссионным и масс-спектральными методами. Полученные данные приведены в таблице 1.

Пробы почв для исследования альгоцианофлоры отбирали в августе 2020 г. и мае 2021 г. в полевом опыте отдела агрохимии и кормопроизводства ФАНЦ НИИСХ Северо-Востока (с. Красное, Кировская область). Почва участка дерново-подзолистая среднесуглинистая на водно-ледниковых отложениях характеризовалась следующими показателями пахотного слоя: содержание гумуса – 1,9%; P_2O_5 – 68 мг/кг, K_2O – 107 мг/кг, pH_{KCl} – 4,4 (сильнокислая почва), гидролитическая кислотность – 5,08 мг-экв./100 г почвы, сумма поглощённых оснований – 10,65 мг-экв./100 г почвы, степень насыщенности основаниями – 69,3%, содержание подвижного алюминия от 4,23 до 5,24 мг/кг.

Изучение видового состава альгофлоры проводили методом постановки чашечных культур со стёклами обрастания. Идентификацию водорослей и ЦБ проводили по сериям определителей. При изучении альгофлоры почв использовали сравнительный анализ видового разнообразия контрольных и опытных вариантов. Опыты закладывали в трёхкратной повторности.

Таблица 1 / Table 1

Химический состав хвостов обогащения фосфоритов
Chemical composition of enrichment tailings of phosphorites

Агрохимическая и экологическая значимость Agrochemical and ecological value	Компонент Component	Размерность Dimension	Содержание в образцах эфеля Content in samples of fine-grained enrichment tailings
Макроэлементы Macroelements	P_2O_5		6,0
	K_2O		4,5
Мезоэлементы Mesoelements	$S_{\text{общ.}} / S_{\text{ген.}}$	%	1,0
	MgO		1,8
	CaO		9,6
Микроэлементы Microelements	MnO	%	0,071
	Fe_2O_3		13,5
	Cr	мг/кг mg/kg	171
	Co		75,2
	Cu		6,5
	Zn		110
Экотоксичные элементы Ecotoxic elements	Mo		1,5
	As		37,9
	Hg		< 0,005
	Pb		14,2
Радиоактивные элементы Radioactive elements	Cd		0,18
	Th		11,6
	U		9,1

Таблица 2 / Table 2

Количество видов водорослей и цианобактерий в контрольных и опытных вариантах
(1 – число видов; 2 – процент)
The number of species of algae and cyanobacteria in control and experimental variants
(1 – the number of species; 2 – percentage)

Вариант эксперимента Variant of experiment	Cyanobacteria		Chlorophyta		Xanthophyta		Bacillariophyta		Всего видов The total species number	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	3	25,3	7	58,4	2	16,3	0	0	12	100
2	6	37,4	8	50,3	2	12,3	0	0	16	100
3	11	50,3	9	40,3	2	9,4	0	0	22	100
4	11	39,0	12	42,0	4	14,0	1	3,0	28	100
Всего / Total	14	38,9	16	44,4	5	13,9	1	2,8	36	100

Варианты эксперимента по влиянию эфеля на реализацию видового состава альгоцианофлоры на почвах разной кислотности: 1 – почва (рН 4,3) без внесения эфеля; 2 – почва (рН 4,3) с внесением эфеля; 3 – почва (рН 5,5) без внесения эфеля; 4 – почва (рН 5,5) с внесением эфеля.

Варианты эксперимента по влиянию размера частиц эфеля на почвенную альгоцианофлору и динамику её развития: контроль – почва (рН 5,5) без внесения эфеля; натуральный эфель – почва (рН 5,5) с внесением натурального эфеля с размером частиц 0,045–1,25 мм; молотый эфель – почва (рН 5,5) с внесением молотого эфеля (размер частиц менее 0,18 мм). Молотый эфель получали размолотом натурального эфеля на шаровой мельнице.

Результаты и обсуждение

Данные о выявленном видовом составе водорослей и ЦБ в контрольных и опытных вариантах почв с рН 4,3 (варианты эксперимента №№ 1 и 2) и с рН 5,5 (варианты эксперимента №№ 3 и 4) приведены в таблице 2.

Всего в контрольных и опытных вариантах было выявлено 36 видов микрофототрофов: Cyanobacteria – 38,9%, Chlorophyta – 44,4%, Xanthophyta – 13,9%, Bacillariophyta – 2,8%.

Согласно результатам эксперимента, реакция альгоцианофлоры на внесение эфеля в почву (рН 4,3) проявилась в увеличении общего видового разнообразия микрофототрофов (табл. 2). Отмечено стимулирующее влияние эфеля на ЦБ в варианте с внесением эфеля (вариант № 2), по сравнению с контролем (вариант № 1), число видов ЦБ увеличилось в два раза.

В почве (рН 5,5) количество видов ЦБ было одинаковым в вариантах с внесением и без внесения эфеля (варианты №№ 3 и 4),

но вариант с внесением эфеля выявил большее число видов зелёных и жёлтозелёных водорослей. Видовой состав почвенной альгоцианофлоры приведён в таблице 3.

Видовой состав альгоцианофлоры характерен для пахотных почв региона. По числу видов преобладают зелёные водоросли и ЦБ, что характерно для почв лесной полосы [12].

Коэффициент общности Сьёренсена-Чекановского показывает высокое сходство альгофлор опытного (4) и контрольного (3) вариантов (80%) почвы с рН 5,5 и умеренное сходство альгофлор опытного (2) и контрольного (1) вариантов почвы с рН 4,3 (табл. 4).

Отмечено влияние фракций эфеля на реализацию представителей систематических групп почвенной альгоцианофлоры (табл. 5).

Применение эфеля в качестве удобрения оказало стимулирующее влияние на развитие водорослей, особенно зелёных. Увеличение их видового разнообразия способствует повышению их роли как накопителей органического вещества. Выделяемые водорослями в окружающую среду внеклеточные продукты и слизистые вещества оболочек оказывают влияние на физические и химические свойства почвы.

Влияние размеров частиц эфеля на динамику реализации видового потенциала почвенной альгоцианофлоры в месячной культуре (время экспозиции с 20.05.21 по 18.06.21) приведено в таблице 6.

За месяц экспозиции почвенной культуры в контрольном варианте выявлено 17 видов микрофототрофов, в опыте с эфелем крупной фракции – 21 вид, мелкой фракции – 27.

Положительное воздействие эфеля на видовое разнообразие азотфиксирующих ЦБ может быть обусловлено наличием в соответствующем отходе фосфора, а также серы, молибдена, кобальта. Известно, что эти эле-

Таблица 3 / Table 3

Видовой состав почвенной альгоцианофлоры, выявленный в разных вариантах эксперимента
Species composition of soil algalcyanoflora in different variants of the experiment

№ п\п No	Название видов Species name	Вариант эксперимента Variant of experiment			
		1	2	3	4
CYANOBACTERIA					
1	<i>Cylindrospermum licheniforme</i> (Bory) Kütz.			+	+
2	<i>Leptolyngbya angustissima</i> (W. et G.S. West) Anagn. et Kom.	+	+	+	+
3	<i>L. boryana</i> (Gom.) Anagn. et Kom.		+	+	+
4	<i>L. foveolarum</i> (Rabenh. et Gom.) Anagn. et Kom.		+	+	+
5	<i>Microcoleus vaginatus</i> (Vauch.) Gom.			+	+
6	<i>Nostoc linckia</i> (Roth) Born. et Flah. f. <i>linckia</i>			+	+
7	<i>N. linckia</i> (Roth) Born. et Flah. f. <i>muscorum</i> (Ag.) Elenk.				+
8	<i>N. paludosum</i> Kütz	+	+	+	+
9	<i>N. punctiforme</i> (Kütz.) Hariot	+	+	+	+
10	<i>Phormidium autumnale</i> (Ag.) Gom.			+	+
11	<i>Ph. boryanum</i> Kütz.		+		
12	<i>Ph. formosum</i> (Bory ex Gom.) Anagn. et Kom.			+	
13	<i>Pseudanabaena catenata</i> Lauterb.			+	+
Всего видов / The total number of species		3	6	11	11
CHLOROPHYTA					
14	<i>Actinochloris sphaerica</i> Korsch.				+
15	<i>Bracteacoccus minor</i> (Chodat) Petrova				+
16	<i>Chlamydomonas gloeogama</i> Korsch. in Pasch. var. <i>gloeogama</i>	+	+	+	+
17	<i>C. oblongella</i> Lund	+		+	
18	<i>C. minutissima</i> Korsch. in Pascher		+	+	+
19	<i>Chlorella minutissima</i> Fott et Novakova	+	+	+	+
20	<i>C. vulgaris</i> Beijer. var. <i>vulgaris</i>	+	+	+	+
21	<i>Chlorococcum infusionum</i> (Schrank) Menegh.	+	+	+	+
22	<i>Gongrosira debaryana</i> Rabenh.		+	+	+
23	<i>Myrmecia bisecta</i> Reisingl				+
24	<i>Scotiellopsis levicostata</i> (Hollerb.) Punccharova et Kalina				+
25	<i>Stichococcus chodatii</i> (Bial.) Heer.	+	+	+	+
26	<i>S. minor</i> Ндг.	+			
27	<i>Tetracystis aggregata</i> Brown et Bold		+	+	+
Всего видов / The total number of species		7	8	9	12
XANTHOPYTA					
28	<i>Botrydiopsis eriensis</i> Snow		+		+
29	<i>Pleurochloris commutata</i> Pasch.	+	+	+	+
30	<i>P. pyrenoidosa</i> Pasch.			+	+
31	<i>Heterococcus viridis</i> Chodat				+
Всего видов / The total number of species		1	2	2	4
EUSTIGMATOPHYTA					
32	<i>Eustigmatos magnus</i> (B. Petersen) Hibberd	+			
Всего видов / The total number of species		1	0	0	0
BACILLARIOPHYTA					
33	<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehr.) Grun. in Cleve et Grun.				+
Всего видов / The total number of species		0	0	0	1
Итого / Total		13	16	22	28

Примечание: / Note: «+» – наличие вида / the presence of the type.

Таблица 4 / Table 4

Коэффициенты Сьёренсена-Чекановского контрольных и опытных вариантов
Sorensen-Chekanovskiy coefficients of the control and experiment variants

Вариант эксперимента / Variant of experiment	1	2	3	4
1		68,0	62,0	48,0
2			73,0	63,0
3				80,0
4				

Таблица 5 / Table 5

Влияние фракций эфеля на почвенную альгофлору
The impact of fractions of fine-grained enrichment tailings on algoflora

Таксоны Taxons	Контроль Control	Натуральный эфель Coarse fraction	Молотый эфель Fine fraction
Cyanobacteria	3	3	4
Chlorophyta	5	10	14
Bacillariophyta	5	5	5
Xantophyta	4	3	4
Всего видов / Species in total	17	21	27

Таблица 6 / Table 6

Динамика реализации видового потенциала водорослей и ЦБ в опыте с натуральным и молотым эфелем, количество видов / The dynamics of algal and cyanobacterial species potential in the experiment with fractions of fine-grained enrichment tailings, number of species

Дата наблюдений Observation date	Контроль Control	Натуральный эфель Coarse fraction	Молотый эфель Fine fraction
01.06.21	9	11	16
07.06.21	13	15	21
18.06.21	17	21	27

менты оказывают стимулирующее влияние на процессы фиксации молекулярного азота [13–16]. Почвы Кировской области, которые использовались для проведения эксперимента, характеризуются низким содержанием значимых для процессов фиксации азота подвижных форм микроэлементов. По данным ФГБУ ГЦАС «Кировский» за 2017 г., средневзвешенное содержание Со в пашнях области составляет 0,84 мг/кг, Мо – 0,07 мг/кг. Внесение эфеля способствует обогащению почвы дефицитными биоэлементами, что положительно отражается на активности почвенных водорослей и ЦБ. Кроме того, содержащиеся в эфеле известковые компоненты и средние фосфаты обеспечивают повышение рН субстрата, благодаря чему оптимизируются условия жизнедеятельности альгоцианобактериальных сообществ.

Заключение

В условиях лабораторного эксперимента проведено изучение реакции фототрофных микроорганизмов пахотной дерново-подзолистой почвы на внесение эфеля, используемого

в качестве удобрения. Отмечена положительная реакция почвенных микрофототрофов, проявившаяся в выявлении большего видового разнообразия альгоцианобактериальной флоры в опытных вариантах по сравнению с контрольными. Изучение влияния хвостов обогащения фосфоритов, используемых в качестве удобрения, на почвенные альго-цианобактериальные сообщества является актуальной проблемой. Вовлечение в сельскохозяйственный оборот новых источников биогенных веществ, не находящихся в настоящее время практического применения и являющихся отходами других производств, требует глубокого изучения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УРО РАН по теме «Оценка и прогноз отсроченного техногенного воздействия на природные и трансформированные экосистемы подзоны южной тайги» № 0414-2018-0003.

References

1. Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Bogatryyova N.N., Kantor G.Ya. Prospects for using phosphate rock enrich-

ment 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

2. 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. 102–106 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-102-106

3. Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Bogatyryova N.N., Kantor G.Ya. Glauconites of the Vyatka-Kama phosphorite-bearing basin // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 2. P. 117–122 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-117-122

4. Makarov B.I., Tereshchenko N.N., Rudmin M.A. Assessment of the efficiency of using glauconite as a fertilizer for spring grain // Izvestiya KGTU. 2020. No. 56. P. 143–156 (in Russian).

5. Dixon R.A., Kahn D. Genetic regulation of biological nitrogen fixation // Nature Reviews Microbiology. 2004. V. 2. No. 8. P. 621–631. doi: 10.1038/nrmicro954

6. Rousk K., Michelsen A. Nitrogen transfer from four nitrogen-fixer associations to plants and soils // Ecosystems. 2016. V. 19. P. 1491–1504. doi: 10.1007/s10021-016-0018-7

7. Shtina E.A., Gollerbach M.M. Ecology of soil algae. Moskva: Nauka, 1976. 143 p. (in Russian).

8. Domracheva L.I. Soil “bloomings” and the laws of its development. Syktyvkar: Institute of biology of Komi SC UB RAS, 2005. 336 p. (in Russian).

9. Pankratova E.M. The role of nitrogen-fixing algae in nitrogen accumulation in soil // Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya biologicheskaya. 1979. No. 2. P. 188–197 (in Russian).

10. Ashikhmina T.Ya., Domracheva L.I., Kondakova L.V., Shirokikh I.G., Shirokikh A.A., Fokina A.I., Skugoreva S.G., Gornostaeva E.A., Soloveva E.S., Tovstik E.V., Ogorodnikova S.Yu., Zykova Yu.N. Microorganisms as agents of biomonitoring and bioremediation of contaminated soils / Eds. T.Ya. Ashikhmina, L.I. Domracheva. Kirov: VyatGU, 2018. 254 p. (in Russian).

11. Kondakova L.V., Dabakh E.V. Algosynusia of floodplain meadows on the technogenic territory // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 3. P. 73–84 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-3-073-084

12. Kondakova L.V., Domracheva L.I. Flora of the Vyatka region. Part 2. Algae (Species composition, specific features of water and soil biocoenoses). Kirov: Kirovskaya oblastnaya tipografia, 2007. 197 p. (in Russian).

13. Wurzbarger N., Bellenger J.P., Kraepiel A.M.L., O Hedin L. Molybdenum and phosphorus interact to constrain asymbiotic nitrogen fixation in tropical forests // PLoS ONE. 2012. V. 7. No. 3. Article No. e33710. doi: 10.1371/journal.pone.0033710

14. Rubio L.M., Ludden P.W. Biosynthesis of the iron-molybdenum cofactor of nitrogenase // Annual Review of Microbiology. 2008. V. 62. No. 1. P. 93–111. doi: 10.1146/annurev.micro.62.081307.162737

15. Moisander P.H., Paerl H., Dyble J., Sivonen K. Phosphorus limitation and diel control of nitrogen-fixing cyanobacteria in the Baltic Sea // Marine Ecology Progress Series. 2007. V. 345. P. 41–50. doi: 10.3354/meps06964

16. Kosiorek M., Wyszowski M. Effect of cobalt on the environment and living organisms – a review // Applied Ecology and Environmental Research. 2019. V. 17. No. 5. P. 11419–11449. doi: 10.15666/aeer/1705_1141911449