

Влияние навозных стоков на почвенные фототрофные микроорганизмы

© 2023. Л. В. Кондакова^{1,2}, д. б. н., профессор, с. н. с.,
Н. В. Сырчина², к. х. н., доцент, с. н. с., Л. В. Пилип³, к. в. н., доцент,
И. А. Кондакова², к. филол. 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,

³Вятский государственный агротехнологический университет,

610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

e-mail: nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com, pilip_larisa@mail.ru

Почвенные фототрофные микроорганизмы вносят значительный вклад в функционирование антропогенных экосистем, активно участвуя в самоочищении почвы путём непосредственного поглощения биогенных элементов и стимуляции деятельности микроорганизмов-минерализаторов за счёт выделяемого при фотосинтезе кислорода. Проведена оценка влияния долговременного внесения в пахотную почву навозных стоков свиноферм на видовое разнообразие почвенных фототрофных микроорганизмов. В почвах, подверженных воздействию жидких навозных стоков, сформировалась группировка видов, толерантных к данному воздействию. Её основу составляют зелёные водоросли: *Klebsormidium flaccidum*, *K. nitens*, *Chlorococcum infusionum*, *Chlorella vulgaris*, безгетероцистная цианобактерия *Phormidium autumnale*, диатомовая водоросль *Hantzschia amphioxys*. Общее видовое разнообразие микрофототрофов в почве экспериментального участка ниже, чем в контроле. Коэффициент Жаккара экспериментального и контрольного участков составляет 47,8%. Отсутствие в составе сообщества микрофототрофов азотфиксирующих цианобактерий указывает на нарушение естественного микроценоза пахотных почв и высокое содержание в почве азота.

Ключевые слова: водоросли, цианобактерии, жидкие навозные стоки.

Manure runoff impact on soil phototrophic microorganisms

© 2023. L. V. Kondakova^{1,2} ORCID: 0000-0002-2190-686X^{*}

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

L. V. Pilip³ ORCID: 0000-0001-9695-7146^{*}

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,

³Vyatka State Agrotechnological University,

133, Oktyabrskiy Prospekt, Kirov, Russia, 610017,

e-mail: nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com, pilip_larisa@mail.ru

Soil phototrophic microorganisms (algae, cyanobacteria) play a very important role in functioning of anthropogenic systems. They take an active part in soil self-purification by directly absorbing biogenic elements, as well as by stimulating the activity of mineralizing microorganisms at the expense of disengaged oxygen. The research was carried out at a plough field with sod-podzol soil situated near a large pig-breeding farm. Neutralization took place due to natural microbiological processes during the time of disgorging the liquid fraction in the lagoons. Long-term application of manure runoff from pig-breeding farms into plough soil had an impact on species diversity of phototrophic microorganisms, which was considered in the research. Groups of species tolerant to the impact formed in the soil in course of long-term application of liquid manure fraction. The influence of long-term runoff of manure from pig breeding farms on specious

diversity of soil phototrophic microorganisms was assessed. In plough soils affected by liquid manure runoff a group of species tolerant to this impact has formed. Their basis is represented by green algae: *Klebsormidium flaccidum*, *K. nitens*, *Chlorococcum infusionum*, *Chlorella vulgaris*, as well as by the heterocyst-free cyanobacteria *Phormidium autumnale* and the diatom alga *Hantzschia amphioxys*. On the surface of plough soil these species make microscopically marked films, i. e. soil “blooming” takes place. General species diversity of microphototrophs in soil of the experimental site is lower than that of the control site. Jaccard coefficient of the experimental and control sites of the field is 47.8%. Nitrogen-fixing cyanobacteria are not represented in the microphototrophic community; it indicates that the natural microcoenosis is damaged in the plough soils and nitrogen content is high.

Keywords: algae, cyanobacteria, liquid manure runoff.

Почвенные фототрофные микроорганизмы (водоросли, цианобактерии) относятся к числу первичных продуцентов, вносящих значительный вклад в функционирование наземных экосистем. Благодаря способности к окисленному фотосинтезу и фиксации атмосферного азота, цианобактерии (ЦБ) принимают активное участие в биогеохимических циклах углерода, азота и фосфора [1–3], играют важную роль в почвообразовательных процессах, способствуют повышению плодородия и предотвращению деградации обрабатываемых земель [4]. Многие виды ЦБ и микроводорослей выделяют в окружающую среду (ОС) специфические биологически активные вещества, оказывающие стимулирующее влияние на развитие высших растений, а также вещества, подавляющие развитие почвенных фитопатогенов [5–7]. В ходе экспериментальных исследований последних лет установлена способность некоторых ЦБ метаболизировать пестициды и аккумулировать тяжёлые металлы [8, 9]. Соответствующие аспекты жизнедеятельности ЦБ имеют большое значение для поддержания супрессивности почв и защиты ОС от загрязнения. Благодаря проявляемым свойствам, ЦБ и микроводоросли находят всё более широкое применение в биотехнологии и «зелёных» технологиях выращивания и защиты сельскохозяйственных культур [10–12].

Большое влияние на видовой состав и количество почвенных ЦБ и микроводорослей оказывает характер использования земельных ресурсов [13]. Глубокая трансформация естественных микробиологических сообществ и нарушение их устойчивости наблюдается на землях сельскохозяйственного назначения, используемых для производства растениеводческой и животноводческой продукции [14, 15].

Интенсивная эксплуатация сельскохозяйственных угодий приводит к масштабному химическому и биологическому загрязнению ОС различными поллютантами [16–18]. Особую опасность для почвенной микробиоты представляют пестициды и содержащиеся в на-

возе животных антибиотики. Для почвенных микрорототрофов характерно образование симбиотических связей с другими микроорганизмами. Комплексное и систематическое воздействие разнообразных стресс-факторов вызывает детерминированные или стохастические сдвиги в стационарных профилях относительной численности микробиоты обрабатываемых земель, нарушает ассоциативные связи ЦБ и микроводорослей, характерные для естественных микробных консорциумов [19].

Работ, посвящённых влиянию навоза сельскохозяйственных животных и навозных стоков животноводческих предприятий на почвенные водоросли и ЦБ умеренных широт до настоящего времени немного. Согласно опубликованным данным [20], в составе альгогруппировок, подверженных действию стоков, было обнаружено 186 видов, относящихся к 6 отделам. Самыми многочисленными по количеству видов являлись зелёные водоросли из порядка Chlorococcales. В сильно загрязнённых почвах доминировали ЦБ, зелёные и эвгленовые водоросли. По мере самоочищения почвы увеличивалось видовое разнообразие зелёных, жёлтозелёных и диатомовых водорослей. Большинство обнаруженных в почве водорослей были обитателями как подверженной воздействию животноводческими стоками почвы, так и незагрязнённой почвы. Основу водорослевых группировок составляли виды, встречающиеся в массе: *Chlorella minutissima*, *Chlorococcum* sp., *Klebsormidium flaccidum*, *Xanthonema exile*, *Luticola mutica*, *Nitzschia palea*, *Hantzschia amphioxys*. Установлено, что под влиянием навозных стоков происходит повышение численности водорослей и ЦБ. В дерново-подзолистой загрязнённой навозными стоками почве численность ЦБ достигала 6595,5 тыс. клеток в 1 г абсолютно сухой почвы при общей численности 8242,45 тыс. клеток; незагрязнённой – меньше 3,6 тыс. при общей численности 47,41 тыс. клеток в 1 г абсолютно сухой почвы. На альгоцианофлору почвы навоз сельскохозяйственных животных и навозные стоки губительного действия не

оказывают. Увеличение численности водорослей происходит в основном за счёт интенсивного развития эврибионтных видов. Водоросли и ЦБ активно участвуют в самоочищении почвы путём непосредственного поглощения органических веществ и биогенных элементов, а также путём стимуляции деятельности микроорганизмов-минерализаторов за счёт выделяемого водорослями кислорода.

Следует отметить, что актуальный уровень экспериментальных данных, характеризующих влияние сельскохозяйственной деятельности на устойчивость локальных микробных сообществ, является недостаточным для объективной оценки возможных рисков для ОС и здоровья человека [21].

Цель настоящей работы состояла в оценке влияния на видовое разнообразие почвенных фототрофных микроорганизмов длительного внесения в пахотную дерново-подзолистую почву навозных стоков свиноферм.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования было выбрано пахотное поле, расположенное вблизи крупного свиноводческого комплекса Кировской области. Поле использовалось в кормовом севообороте. Почва дерново-подзолистая суглинистая. В течение последних 7 лет в соответствующую пашню вносили обезвреженную жидкую фракцию (ЖФ) свиных навозных стоков, откачиваемых из прудов-накопителей (лагунов). Процесс обезвреживания осуществлялся за счёт естественных микробиологических процессов в период выдерживания ЖФ в лагунах. Для внесения ЖФ применяли буксируемую шланговую систему. Нормы внесения рассчитывала агрохимическая служба предприятия, исходя из содержания в ЖФ азота. Среднегодовое внесение азота с ЖФ составляло 200 кг/га, что соответствует рекомендуемым нормам [22].

Отбор проб почвы на пахотном поле (экспериментальные пробы) для химических и микробиологических исследований проводили в сентябре 2022 г. после уборки урожая (кукурузы на силос) в соответствии с ГОСТ Р 58595-2019 с соблюдением стерильности, правил этикетирования и хранения проб. Контрольные пробы отбирали аналогично экспериментальным на расстоянии 500 м от экспериментального участка на окраине пашни у леса. Механический состав экспериментальных и контрольных проб был

одинаков – средний суглинок. Химические и микробиологические исследования отобранных проб выполняли в специализированных лабораториях Вятского государственного университета. Видовой состав водорослей определяли методами прямого микроскопирования почвы, постановкой водных и чашечных культур со «стёклами обрастания» [23]. Прямое микроскопирование поверхностных разрастаний позволяло определять виды, которые массово развивались на поверхности почвы. Инкубация культур проводилась при дневном освещении и в люминостате.

Все экспериментальные исследования проводили в трёхкратной повторности. Статистическую обработку результатов выполняли стандартными методами с использованием встроенного пакета программ Excel, STATISTICA 10.

Результаты и обсуждение

Результаты химического анализа отобранных проб почвы приведены в таблице 1.

Согласно приведённым в таблице 1 данным, химический состав проб почвы, отобранных на пахотном поле, существенно отличается от химического состава контрольных проб. Для экспериментальных проб характерна более низкая кислотность, очень высокое содержание подвижных форм фосфора и калия и более высокое, чем в контрольных пробах, содержание органического вещества, подвижной серы и микроэлементов (кроме Fe).

Данные, полученные в результате выполнения микробиологических исследований, приведены в таблице 2.

В наземных поверхностных разрастаниях принимают участие от 5 до 27 популяций фототрофных микроорганизмов. Видовое богатство фототрофного комплекса может возрастать при благоприятных условиях влажности и наличия биогенных элементов [24]. Видовой состав поверхностных разрастаний микрофототрофов является индикационным признаком. В плёнках «цветения» экспериментального и контрольного участков выявлено невысокое видовое разнообразие почвенных микрофототрофов – 12 видов, в том числе: Cyanobacteria – 1, Chlorophyta – 7, Bacillariophyta – 3, Xhantophyta – 1. На экспериментальном участке выявлено 9 видов, на контрольном – 12. Доминантами «цветения» экспериментального участка являлись нитчатые зелёные водоросли: *Klebsormidium flaccidum*, *K. nitens*, *K. rivulare*, развивающиеся в пахотных и це-

Таблица 1 / Table 1

Химический состав почвы / Chemical composition of soil

Показатель Index	Значение показателя / Index value		Метод анализа Analysis method
	эксперимент experiment	контроль control	
pH _{KCl} , ед. pH pH _{KCl} , pH unit	5,4±0,2	4,1±0,2	ГОСТ 26483-85 GOST 26483-85
Органическое вещество, % Organic matter, %	3,0±0,5	2,0±0,4	ГОСТ 26213-91 GOST 26213-91
Азот (NO ₃ ⁻), мг/кг Nitrogen (NO ₃ ⁻), mg/kg	2,9±0,8	1,2±0,5	ГОСТ Р 53219-2008 GOST Р 53219-2008
Азот (NH ₄ ⁺), мг/кг Nitrogen (NH ₄ ⁺), mg/kg	22±6	17±5	
Са обменный, мг/кг Ca exchangeable, mg/kg	9,4±0,9	7,5±0,6	ГОСТ 26487-85 GOST 26487-85
P ₂ O ₅ подвижный, мг/кг P ₂ O ₅ mobile, mg/kg	960±180	120±18	ГОСТ Р 54650-2011 GOST Р 54650-2011
K ₂ O обменный, мг/кг K ₂ O exchangeable, mg/kg	645±90	136±29	
Сера подвижная, мг/кг Sulfur mobile, mg/kg	9,4± 2,5	3,5±1,0	ГОСТ 26490-85 GOST 26490-85
Fe подвижное, мг/кг Fe mobile, mg/kg	21±5	35±5	Атомно-абсорбционный по ФР 1.31.2018.31189
Cu подвижная, мг/кг Cu mobile, mg/kg	1,8±0,5	1,6±0,5	Atomic absorbing according to FR 1.31.2018.31189
Zn подвижный, мг/кг Zn mobile, mg/kg	7,9±2,5	2,5±0,6	
Mn подвижный, мг/кг Mn mobile, mg/kg	132±30	13,4±0,5	

Таблица 2 / Table 2

Видовое разнообразие микрофототрофов в поверхностных разрастаниях
Species diversity of microphototrophs in surface spreads

№ / No.	Отделы, виды / Groups, species	1	2
Cyanobacteria			
1	<i>Phormidium autumnale</i> (Ag.) Gom.	+	+
Chlorophyta			
2	<i>Chlorella minutissima</i> Fott et Novakova	-	+
3	<i>C. vulgaris</i> Beijer.	+	+
4	<i>Chlamydomonas gloeogama</i> Korsch. in Pasch.	-	+
5	<i>Klebsormidium nitens</i> (Menegh. in Kütz.) Lohk.	+	+
6	<i>K. flaccidum</i> (Kütz.) Silva et al.	+	+
7	<i>K. rivulare</i> (Kütz.), comb. nova	+	+
8	<i>Follicularia paradoxalis</i> Miller	-	+
Bacillariophyta			
9	<i>Navicula pelliculosa</i> (Breb.) Hilse	+	+
10	<i>Pinnularia intermedia</i> Lagerst.	+	+
11	<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehr.) Grun. in Cleve et Grun.	+	+
Xhantophyta			
12	<i>Bumilleriopsis brevis</i> (Gern.) Printz	+	+
Всего видов / Total number of species		9	12

Примечание: 1 – экспериментальный участок; 2 – контрольный участок; «-» – отсутствие вида.
Note: 1 – the experimental site, 2 – the control site; “-” – absence of the species.

Таблица 3 / Table 3

Видовое разнообразие альгоцианофлоры в посевах кукурузы
Species diversity of algocyanoflora in corn crops

№ / No.	Отделы, виды / Groups, species	1	2
Cyanobacteria			
1	<i>Phormidium autumnale</i> (Ag.) Gom.	+	+
2	<i>Leptolyngbya foveolarum</i> (Rabenh. et Gom.) Anagn. et Kom.	–	+
3	<i>L. boryana</i> (Gom.) Anagn. et Kom.	–	+
Chlorophyta			
4	<i>Actinochloris sphaerica</i> Korsch.	–	+
5	<i>Bracteacoccus minor</i> (Chodat) Petrova	–	+
6	<i>Chlorella minutissima</i> Fott et Novakova	+	+
7	<i>C. vulgaris</i> Beijer.	+	+
8	<i>Chlamydomonas gloeogama</i> Korsch. in Pasch.	+	+
9	<i>C. minutissima</i> Korsch. in Pascher	+	+
10	<i>Chlorococcum infusionum</i> (Schrank) Menegh.	+	+
11	<i>Klebsormidium nitens</i> (Menegh. in Kütz.) Lokh.	+	+
12	<i>K. flaccidum</i> (Kütz.) Silva et al.	+	+
13	<i>K. rivulare</i> (Kütz.), comb. nova	–	+
14	<i>Pseudococcomyxa simplex</i> (Mainx) Fott	+	–
15	<i>Tetracystis aggregata</i> Brown et Bold	+	+
Bacillariophyta			
16	<i>Navicula pelliculosa</i> (Breb.) Hilse	+	–
17	<i>Luticola mutica</i> (Kütz.) Mann in Round et al.	+	–
18	<i>Pinnularia intermedia</i> Lagerst.	+	+
19	<i>P. borealis</i> Ehr.	–	+
20	<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehr.) Grun.	+	+
Xanthophyta			
21	<i>Pleurochloris pyrenoidosa</i> Pasch.	–	+
22	<i>Xanthonema exile</i> (Klebs) Silva	–	+
Eustigmatophyta			
23	<i>Eustigmatos magnus</i> (B. Petersen) Hibberd	–	+
Всего видов / Total number of species		13	19

Примечание: 1 – экспериментальный участок; 2 – контрольный участок; «–» – отсутствие вида.
Note: 1 – the experimental site, 2 – the control site; “–” – absence of the species.

линных почвах региона и в почвах, испытывающих техногенную нагрузку. В поверхностных разрастаниях была отмечена безгетероцистная ЦБ *Phormidium autumnale*, также широко распространённый и толерантный к антропогенной нагрузке вид. На контрольном участке доминантами сообществ являлись зелёные водоросли: *Chlorella minutissima*, *Chlorococcum infusionum*, *Klebsormidium flaccidum*, *K. nitens* и ЦБ *Phormidium autumnale*. Коэффициент Жаккара показывает высокое сходство доминирующих видов в плёнках «цветения» (75%).

При постановке чашечных и водных культур на обоих участках выявлена более разнообразная альгоцианофлора (табл. 3). По числу видов также преобладали зелёные водоросли, при этом не были отмечены азотфиксирующие ЦБ, за-

вершающие сезонную сукцессию на пахотных дерново-подзолистых почвах. Осеннее «цветение» пахотных дерново-подзолистых почв, не подверженных воздействию в качестве удобрения животноводческими стоками, характеризуется массовым развитием ЦБ с доминированием азотфиксирующих видов из родов *Anabaena*, *Cylindrospermum*, *Nostoc*, *Tolypothrix* [25].

Практически, как и 30 лет назад [20], основу современных группировок водорослей составляли виды: *Chlorella minutissima*, *Chlorococcum infusionum*, *Klebsormidium flaccidum*, *K. nitens*, *Xanthonema exile*, *Luticola mutica*, *Hantzschia amphioxys*.

Коэффициент Жаккара экспериментального и контрольного участков составляет 47,8%, что указывает на умеренное сходство альгоцианофлор.

Заключение

В пахотных почвах, испытывающих длительное влияние вносимых в качестве удобрения животноводческих стоков, сформировалась группировка видов, основу которой составляют нитчатые и одноклеточные зелёные водоросли, толерантные к высоким дозам азотных удобрений. Отсутствие в составе сообществ микрофототрофов азотфиксирующих цианобактерий, завершающих сезонную сукцессию фототрофных микроорганизмов в пахотных почвах, является индикатором нарушения естественных почвенных процессов.

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.

Литература

1. Штина Э.А. Почвенные водоросли как экологические индикаторы // Ботанический журнал. 1990. Т. 75. № 4. С. 441–453.
2. Csotonyi J.T., Swiderski J., Stackebrandt E., Yurkov V. A new environment for aerobic anoxygenic phototrophic bacteria: biological soil crusts // Environmental Microbiology Reports. 2010. V. 2. No. 5. P. 651–656.
3. Mukherjee C., Chowdhury R., Ray K. Phosphorus recycling from an unexplored source by polyphosphate accumulating microalgae and cyanobacteria – A step to phosphorus security in agriculture // Frontiers in Microbiology. 2015. V. 6. Article No. 1421.
4. Mutale-Joan C., Sbabou L., Hicham E.A. Microalgae and cyanobacteria: how exploiting these microbial resources can address the underlying challenges related to food sources and sustainable agriculture: a review // Journal of Plant Growth Regulation. 2023. V. 42. No. 1. P. 1–20.
5. Prasanna R., Sood A., Jaiswal P., Nayak S., Gupta V., Chaudhary V., Joshi M., Natarajan C. Rediscovering cyanobacteria as valuable sources of bioactive compounds (review) // Appl. Biochem. Microbiol. 2010. V. 46. No. 2. P. 119–134.
6. Shah S.T., Basit A., Ullah I., Mohamed H.I. Cyanobacteria and algae as biocontrol agents against fungal and bacterial plant pathogens // Plant Growth-Promoting Microbes for Sustainable Biotic and Abiotic Stress Management / Eds. H.I. Mohamed, H.E.-D.S. El-Beltagi, K.A. Abd-Elsalam. Springer, 2021. P. 1–23.
7. Tan C.Y., Dodd I.C., Chen J.E., Phang S.M., Chin C.F., Yow Y.Y., Ratnayeke S. Regulation of algal and cyanobacterial auxin production, physiology, and application in agriculture: an overview // Journal of Applied Phycology. 2021. V. 33. No. 5. P. 2995–3023.

8. Singh H., Khattar J.S., Ahluwalia A.S. Cyanobacteria and agricultural crops // Vegetos. 2014. V. 27. No. 1. P. 37–44.
9. García-Galán M.J., Monllor-Alcaraz L.S., Postigo C., Uggetti E., López de Alda M., Díez-Montero R., García J. Microalgae-based bioremediation of water contaminated by pesticides in peri-urban agricultural areas // Environmental Pollution. 2020. V. 265. Article No. 114579.
10. Gonçalves A.L. The use of microalgae and cyanobacteria in the improvement of agricultural practices: a review on their biofertilising, biostimulating and biopesticide roles // Applied Sciences. 2021. V. 11. No. 2. Article No. 871.
11. Renuka N., Guldhe A., Prasanna R., Singh P., Bux F. Microalgae as multi-functional options in modern agriculture: current trends, prospects and challenges // Biotechnology Advances. 2018. V. 36. No. 4. P. 1255–1273.
12. Dineshkumar R., Kumaravel R., Gopalsamy J., Sikder M.N.A., Sampathkumar P. Microalgae as biofertilizers for rice growth and seed yield productivity // Waste and Biomass Valorization. 2018. V. 9. P. 793–800.
13. Manoharan L., Kushwaha S.K., Ahrén D., Hedlund K. Agricultural land use determines functional genetic diversity of soil microbial communities // Soil Biology and Biochemistry. 2017. V. 115. P. 423–432.
14. Crouzet O., Consentino L., Pétraud J.P., Marraud C., Aguer J.P., Bureau S., Le Bourvellec C., Bérard A. Soil photosynthetic microbial communities mediate aggregate stability: influence of cropping systems and herbicide use in an agricultural soil // Frontiers in Microbiology. 2019. V. 10. Article No. 1319.
15. Chaer G., Fernandes M., Myrold D., Bottomley P. Comparative resistance and resilience of soil microbial communities and enzyme activities in adjacent native forest and agricultural soils // Microbial Ecology. 2009. V. 58. P. 414–424.
16. Пилип Л.В., Сырчина Н.В., Козвонин В.А., Колеватых Е.П., Ашихмина Т.Я., Сазанов А.В. Биологическое загрязнение пахотных земель отходами свиноводства // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 199–205.
17. Сырчина Н.В., Пилип Л.В., Ашихмина Т.Я. Химическая деградация земель под воздействием отходов животноводства // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 219–225.
18. Пилип Л.В., Сырчина Н.В., Кузнецов Д.А. Животноводческие комплексы как источники загрязнения окружающей среды тяжёлыми металлами (Cu, Zn) // Принципы экологии. 2023. Т. 12. № 1. С. 89–96.
19. Rocca J.D., Simonin M., Blaszcak J.R., Ernakovich J.G., Gibbons S.M., Midani F.S., Washburne A.D. The microbiome stress project: toward a global meta-analysis of environmental stressors and their effects on microbial communities // Frontiers in Microbiology. 2018. V. 9. Article No. 3272.
20. Малышева О.А. Формирование альгогруппировок на почвах, загрязнённых животноводческими

стоками // Микроорганизмы в сельском хозяйстве: Труды докладов IV Всесоюзной научной конференции. Пушино, 1992. С. 123.

21. Beattie R.E., Bandla A., Swarup S., Hristova K.R. Freshwater sediment microbial communities are not resilient to disturbance from agricultural land runoff // *Frontiers in Microbiology*. 2020. V. 11. Article No. 539921.

22. Трухачев В.И., Злыднев Н.З., Злыднева Р.М. Производство и использование органических удобрений // *Вестник АПК Ставрополя*. 2015. № 2. С. 120–131.

23. Штина Э.А., Голлербах М.М. Экология почвенных водорослей. М.: Наука, 1976. 144 с.

24. Домрачева Л.И. «Цветение» почвы и закономерности его развития. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2005. 336 с.

25. Кондакова Л.В., Кислицына А.П. «Цветение» почвы в вариантах полевого опыта под травосмесями // *Экология родного края: проблемы и пути их решения: материалы XV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Книга 2. Киров: Вятский государственный университет, 2020. С. 62–67.

References

1. Shtina E.A. Soil algae as ecological indicators // *Botanicheskiy Zhurnal*. 1990. V. 75. No. 4. P. 441–453 (in Russian).

2. Csotonyi J.T., Swiderski J., Stackebrandt E., Yurkov V. A new environment for aerobic anoxygenic phototrophic bacteria: biological soil crusts // *Environmental Microbiology Reports*. 2010. V. 2. No. 5. P. 651–656. doi: 10.1111/j.1758-2229.2010.00151.x

3. Mukherjee C., Chowdhury R., Ray K. Phosphorus recycling from an unexplored source by polyphosphate accumulating microalgae and cyanobacteria – A step to phosphorus security in agriculture // *Frontiers in Microbiology*. 2015. V. 6. Article No. 1421. doi: 10.3389/fmicb.2015.01421

4. Mutale-Joan C., Sbabou L., Hicham E.A. Microalgae and cyanobacteria: how exploiting these microbial resources can address the underlying challenges related to food sources and sustainable agriculture: a review // *Journal of Plant Growth Regulation*. 2023. V. 42. No. 1. P. 1–20. doi: 10.1007/s00344-021-10534-9

5. Prasanna R., Sood A., Jaiswal P., Nayak S., Gupta V., Chaudhary V., Joshi M., Natarajan C. Rediscovering cyanobacteria as valuable sources of bioactive compounds (review) // *Appl. Biochem. Microbiol*. 2010. V. 46. No. 2. P. 119–134. doi: 10.1134/S0003683810020018

6. Shah S.T., Basit A., Ullah I., Mohamed H.I. Cyanobacteria and algae as biocontrol agents against fungal and bacterial plant pathogens // *Plant Growth-Promoting Microbes for Sustainable Biotic and Abiotic Stress Management* / Eds. H.I. Mohamed, H.E.-D.S. El-Beltagi, K.A. Abd-Elsalam. Springer, 2021. P. 1–23. doi: 10.1007/978-3-030-66587-6_1

7. Tan C.Y., Dodd I.C., Chen J.E., Phang S.M., Chin C.F., Yow Y.Y., Ratnayake S. Regulation of algal and cyanobacterial auxin production, physiology, and application in agriculture: an overview // *Journal of Applied Phycology*. 2021. V. 33. No. 5. P. 2995–3023. doi: 10.1007/s10811-021-02475-3

8. Singh H., Khattar J.S., Ahluwalia A.S. Cyanobacteria and agricultural crops // *Vegetos*. 2014. V. 27. No. 1. P. 37–44. doi: 10.5958/j.2229-4473.27.1.008

9. García-Galán M.J., Monllor-Alcaraz L.S., Postigo C., Uggetti E., López de Alda M., Díez-Montero R., García J. Microalgae-based bioremediation of water contaminated by pesticides in peri-urban agricultural areas // *Environmental Pollution*. 2020. V. 265. Article No. 114579. doi: 10.1016/j.envpol.2020.114579

10. Gonçalves A.L. The use of microalgae and cyanobacteria in the improvement of agricultural practices: a review on their biofertilising, biostimulating and biopesticide roles // *Applied Sciences*. 2021. V. 11. No. 2. Article No. 871. doi: 10.3390/app11020871

11. Renuka N., Guldhe A., Prasanna R., Singh P., Bux F. Microalgae as multi-functional options in modern agriculture: current trends, prospects and challenges // *Biotechnology Advances*. 2018. V. 36. No. 4. P. 1255–1273. doi: 10.1016/j.biotechadv.2018.04.004

12. Dineshkumar R., Kumaravel R., Gopalsamy J., Sikder M.N.A., Sampathkumar P. Microalgae as biofertilizers for rice growth and seed yield productivity // *Waste and Biomass Valorization*. 2018. V. 9. P. 793–800. doi: 10.1007/s12649-017-9873-5

13. Manoharan L., Kushwaha S.K., Ahrén D., Hedlund K. Agricultural land use determines functional genetic diversity of soil microbial communities // *Soil Biology and Biochemistry*. 2017. V. 115. P. 423–432. doi: 10.1016/j.soilbio.2017.09.011

14. Crouzet O., Consentino L., Pêtraud J.P., Marraud C., Aguer J.P., Bureau S., Le Bourvellec C., Bérard A. Soil photosynthetic microbial communities mediate aggregate stability: influence of cropping systems and herbicide use in an agricultural soil // *Frontiers in Microbiology*. 2019. V. 10. Article No. 1319. doi: 10.3389/fmicb.2019.01319

15. Chaer G., Fernandes M., Myrold D., Bottomley P. Comparative resistance and resilience of soil microbial communities and enzyme activities in adjacent native forest and agricultural soils // *Microbial Ecology*. 2009. V. 58. P. 414–424. doi: 10.1007/s00248-009-9508-x

16. Pilip L.V., Syrchina N.V., Kozvonin V.A., Kolveatykh E.P., Ashikhmina T.Ya., Sazanov A.V. Biological pollution of plough soils with pig-breeding wastes // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 199–205 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-199-205

17. Syrchina N.V., Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya. Chemical degradation of soil under the impact of farm animal waste // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 219–225 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-219-225

18. Pilip L.V., Syrchina N.V., Kuznetsov D.A. Livestock breeding complexes as a sources of pollution of the environment with heavy metals (Cu, Zn) // *Ecology Principles*. 2023. V. 12. No. 1. P. 89–96 (in Russian). doi: 10.15393/j1.art.2023.13182
19. Rocca J.D., Simonin M., Blaszcak J.R., Ernakovich J.G., Gibbons S.M., Midani F.S., Washburne A.D. The microbiome stress project: toward a global meta-analysis of environmental stressors and their effects on microbial communities // *Frontiers in Microbiology*. 2018. V. 9. Article No. 3272. doi: 10.3389/fmicb.2018.03272
20. Malysheva O.A. Formation of algo-groups in soils polluted with liquid farm animal wastes // *Microorganisms in agriculture: Doklady IV Vsesoyuznoy nauchnoy konferencii*. 1992. P. 123 (in Russian).
21. Beattie R.E., Bandla A., Swarup S., Hristova K.R. Freshwater sediment microbial communities are not resilient to disturbance from agricultural land runoff // *Frontiers in Microbiology*. 2020. V. 11. Article No. 539921. doi: 10.3389/fmicb.2020.539921
22. Trukhachev V.I., Zlydnev N.Z., Zlydneva R.M. Production and use of organic fertilizers // *Agricultural Bulletin of Stavropol Region*. 2015. No. 2. P. 120–131 (in Russian).
23. Shtina E.A., Gollerbach M.M. *Soil algae ecology*. Moskva: Nauka, 1976. 144 p. (in Russian).
24. Domracheva L.I. *Soil “blooming” and the laws of its development*. Syktyvkar: Komi NTs UrO RAN, 2005. 336 p. (in Russian).
25. Kondakova L.V., Kislitsyna A.P. Soil “blooming” in variants of a field experiment under grass mixtures // *Ecology of the native land: problems and ways of their solving: Materyaly XV Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2020. P. 62–67 (in Russian).