

Светлана Владиславна Прудникова

Сибирский федеральный университет, Институт фундаментальной биологии и биотехнологии, профессор базовой кафедры биотехнологии, доктор биологических наук, Красноярск, Россия

E-mail: sprudnikova.sfu@gmail.com

Надежда Владимировна Стрельцова

Сибирский федеральный университет, Институт фундаментальной биологии и биотехнологии, ассистент базовой кафедры биотехнологии, Красноярск, Россия

E-mail: streltsova-96@mail.ru

Василий Николаевич Романов

Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН», главный научный сотрудник отдела агротехнологий, доктор сельскохозяйственных наук, Красноярск, Россия

E-mail: romanov@sh.krasn.ru

Наталья Леонидовна Кураченко

Красноярский государственный аграрный университет, профессор кафедры почвоведения и агрохимии, доктор биологических наук, профессор, Красноярск, Россия

E-mail: kurachenko@mail.ru

ОЦЕНКА МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АГРОЧЕРНОЗЕМОВ ОПЫТНЫХ ХОЗЯЙСТВ КРАСНОЯРСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ

Цель исследования – оценка структуры микробных сообществ агрочерноземов Красноярской лесостепи на опытных полях учхоза «Миндерлинское» ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ и Мининского полевого стационара КрасНИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН. Исследование почвенной микрофлоры проводили в вегетационный период 2020 г. Анализ микробиологических показателей образцов почвы проводили общепринятыми методами. Оценивали количественные показатели эколого-трофических групп микроорганизмов: копитроффов – на мясопептонном агаре, прототроффов – на крахмало-аммиачном агаре, олиготроффов – на почвенном агаре, азотфиксаторов и олигонитрофилов – на агаре Эшби. Рассчитывали коэффициенты минерализации и олиготрофности. Численность почвенных микромицетов определяли на картофельно-декстрозном агаре. Посев почвенных суспензий производили в трехкратной повторности из разведений до 10^6 . Идентификацию микромицетов проводили на основании морфологических признаков. Идентификацию чистых культур доминирующих бактерий проводили методом времяпролетной масс-спектрометрии с использованием масс-спектрометра MALDI-TOF MS Microflex. Установлены высокие значения коэффициентов минерализации и олиготрофности для почв учхоза «Миндерлинское» – $1,85 \pm 0,05$ и $0,94 \pm 0,02$ и низкие значения для почв Мининского стационара – $2,30 \pm 0,01$ и $0,82 \pm 0,03$ соответственно. Выделены и идентифицированы виды бактерий, доминирующие в течение полевого сезона в районах с различными агрохимическими характеристиками почвы. Установлены различия в таксономическом составе микробных сообществ в районах исследования: в почвах учхоза «Миндерлинское» преобладали виды рода *Bacillus* (*B. simplex*, *B. marisflavi* и *B. pumilus*), в почвах Мининского полевого стационара доминировали *Pseudomonas mandelii*, *Bacillus safensis*, *Rhodococcus erythropolis*, *Arthrobacter polychromogenes* и *Arthrobacter parietis*. Присутствие в микробных популяциях видов, описанных ранее как деструкторы полиароматических углеводородов, полигидроксиалканоатов и других органических соединений, указывает на высокий деградиционный потенциал агрогенных почв. Среди популяции микромицетов во всех почвенных пробах в течение полевого сезона доминировали виды рода *Penicillium*. Показано, что почвы уч-

хоза «Миндерлинское» обладают высоким уровнем супрессивности, благодаря большой популяции грибов рода *Trichoderma*, сдерживающей развитие фитопатогенных микромицетов *Alternaria* и *Fusarium*.

Ключевые слова: почвенные микроорганизмы, агроценозы, динамика численности, структура микробных сообществ, фитопатогенные грибы, бактерии-деструкторы.

Svetlana V. Prudnikova

Siberian Federal University, Institute of Fundamental Biology and Biotechnology, Professor at the Basic Department of Biotechnology, Doctor of Biological Sciences, Krasnoyarsk, Russia

E-mail: sprudnikova.sfu@gmail.com

Nadezhda V. Streltsova

Siberian Federal University, Institute of Fundamental Biology and Biotechnology, Assistant at the Basic Department of Biotechnology, Krasnoyarsk, Russia

E-mail: streltsova-96@mail.ru

Vasily N. Romanov

Krasnoyarsk Research Institute of Agriculture - a separate subdivision of the Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", Chief Researcher at the Department of Agricultural Technologies, Doctor of Agricultural Sciences, Krasnoyarsk, Russia

E-mail: romanov@sh.krasn.ru

Natalia L. Kurachenko

Krasnoyarsk State Agrarian University, Professor at the Department of Soil Science and Agrochemistry, Doctor of Biological Sciences, Professor, Krasnoyarsk, Russia

E-mail: kurachenko@mail.ru

**KRASNOYARSK FOREST-STEPPE
TRIAL FIELDS AGROCHERNOZEM MICROBIOLOGICAL INDICATORS ASSESSMENT**

*The purpose of the study is to assess the structure of microbial communities in agrochernozems of the Krasnoyarsk forest-steppe on the experimental fields of the Minderlinskoye farm of the Krasnoyarsk GAU and the Minino field station of the Krasnoyarsk Research Institute of Agriculture, KSC SB RAS. The study of soil microflora was carried out during the growing season of 2020. Analysis of microbiological parameters of soil samples was conducted by conventional methods. The quantitative indicators of ecological and trophic groups of microorganisms were assessed: copiotrophs – on mesopatamia agar, prototrophs – on starch-ammonia agar, oligotrophs – on soil agar, nitrogen fixers and oligonitrophils – on Ashby agar. The coefficients of mineralization and oligotrophy were calculated. The number of soil micromycetes was determined on potato-dextrose agar. Sowing of soil suspensions was carried out in triplicate from dilutions up to 10^6 . Identification of micromycetes was performed on the basis of morphological characteristics. Pure cultures of dominant bacteria were identified by time-of-flight mass spectrometry using a MALDI-TOF MS Microflex mass spectrometer. The high values of the coefficients of mineralization and oligotrophy for the soils of the Minderlinskoye experimental farm were established – 1.85 ± 0.05 and 0.94 ± 0.02 and low values for the soils of the Minino station – 2.30 ± 0.01 and 0.82 ± 0.03 respectively. The species of bacteria that dominate during the field season in areas with different agrochemical soil characteristics have been isolated and identified. Differences in the taxonomic composition of microbial communities in the study areas were established: species of the genus *Bacillus* (*B. simplex*, *B. marisflavi*, and *B. pumilus*) prevailed in the soils of the Minderlinskoye experimental farm, while in the soils of the Minino field station *Pseudomonas mandelii*, *Bacillus safensis*, *Rhopoldococc* *Arthrobacter polychromogenes* and *Arthrobacter parietis* dominated. The presence in microbial populations of species previously described as destructors of polyaromatic hydrocarbons, polyhydroxyalkanoates, and other organic compounds indicates a high degradation potential of agrogenic soils. Species of the genus *Penicillium* dominated among the micromycete population in all soil samples during the field season. It has been shown that the soils of the Minderlinskoye experimental farm have a high level of suppression due to the large population of fungi of*

the genus Trichoderma, which inhibits the development of phytopathogenic micromycetes Alternaria and Fusarium.

Keywords: soil microorganisms, agrocenoses, abundance dynamics, microbial communities' structure, phytopathogenic fungi, bacteria- destructors.

Введение. Агроэкосистемы испытывают значительный антропогенный прессинг, негативно отражающийся на плодородии почв и состоянии почвенной биоты. Микробные сообщества почвы играют ключевую роль в функционировании агроэкосистем, оказывая влияние на качество почвы, доступность питательных веществ и развитие растений, а также осуществляют трансформацию пестицидов и иных поллютантов, инактивируя их или используя в качестве питательных субстратов. Между тем избыточные концентрации пестицидов в агрогенных почвах могут оказывать негативное воздействие на микроорганизмы, снижая их ферментативную активность, что в сочетании со слабой биodeградируемостью пестицидов может представлять серьезный риск для окружающей среды и здоровья человека [1–3]. Несмотря на высокую специфичность современных пестицидов, невозможно полностью избежать отрицательного воздействия на нецелевые объекты, так как механизмы действия этих препаратов основаны на нарушении биосинтетических процессов и затрагивают важные клеточные функции [4, 5]. Длительное применение агрохимикатов приводит к значительному снижению численности и видового разнообразия почвенных микроорганизмов [6], а это в свою очередь нарушает процессы почвообразования, снижает продуктивность почвы и ее деградационный потенциал не только в отношении пестицидов, но и в отношении разнообразных полимерных материалов, которые широко применяются в сельском хозяйстве в качестве укрывного и мульчирующего материала, тары и упаковки, полива и орошения, основы для депонирования удобрений и пестицидов и т. д. [7, 8].

Существующая проблема загрязнения почв неразрушаемыми пластиками ведет к необходимости перехода на биodeградируемые материалы, трансформирующиеся в почве под действием микроорганизмов в безопасные вещества, нетоксичные для биоты. В качестве альтер-

нативы рассматривается целый ряд биополимеров – полилактид, целлюлоза, агароза, крахмал, хитозан, полигликолид, полигидроксиалканоаты и пр. [9–12]. Среди широкого спектра биополимеров полигидроксиалканоаты (ПГА) обладают рядом преимуществ – способны к полной деградации в почве под действием микробных ферментов, не угнетают развитие почвенной биоты и растений, совместимы со многими агропрепаратами. Также ПГА оказывают селективное действие на почвенную микрофлору в сторону увеличения видового разнообразия бактерий – деструкторов, обладающих способностью к биodeградации труднодоступных органических соединений (углеводородов, ксенобиотиков), и усиливают таким образом биodeградационный потенциал почв [12].

Высокая антропогенная нагрузка на агроэкосистемы может негативно повлиять на структуру микробного сообщества, поэтому важно учитывать этот фактор при оценке метаболического потенциала агрогенных почв.

Цель исследования: оценка структуры микробных сообществ агрочерноземов Красноярской лесостепи на опытных полях учхоза «Миндерлинское» ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ и Мининского полевого стационара КрасНИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН.

Объект и методы исследования. Исследование почвенной микрофлоры проводили в вегетационный период 2020 г. на опытных участках учхоза «Миндерлинское» ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет» (п. Борск, Сухобузимский район, Красноярский край) и Мининского полевого стационара Красноярского НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН (д. Минино, Емельяновский район, Красноярский край). Агрохимические показатели почвы исследуемых участков представлены в таблице 1. Вегетационный сезон 2020 г. характеризовался как теплый, с высокой среднесуточной температурой в начале вегетационного периода (табл. 2).

Характеристика почвы в районах исследования (0–20 см)

Показатель	Учхоз «Миндерлинское»	Мининский стационар
Тип почвы	Чернозем выщелоченный, среднетощный, легкоглинистый	Чернозем обыкновенный, маломощный, среднесуглинистый
Содержание гумуса	6,6–7,2	8,4–8,7
pH _{H₂O}	6,9–7,5	7,1–7,8
Сумма поглощенных оснований, моль/100 г	51,5–63,5	40,0–45,5
Азот нитратный, мг/кг	4,5–4,9	7,6–19,3
Подвижный фосфор, мг/кг	161,3–190,3	49–53
Обменный калий, мг/кг	270,3–311,7	214,0–269,0
Запасы продуктивной влаги, мм	43,8	32,3

Таблица 2

Показатели температуры и количества осадков вегетационного сезона 2020 г.

Месяц	Средняя температура воздуха, °С	Средне многолетние показатели температуры воздуха, °С	Сумма осадков за месяц, мм	Средне многолетний уровень осадков, мм
Мининский стационар				
Май	14,0	9,8	93	37,4
Июнь	15,7	18,0	94	63
Июль	18,2	19,0	111,3	76
Август	18,1	15,7	76,9	67
Учхоз «Миндерлинское»				
Май	14,0	8,0	52,0	32,0
Июнь	16,3	15,2	103,0	44,0
Июль	19,6	18,4	58,0	69,0
Август	18,1	14,9	52,0	62,0

Количество осадков в д. Монино с мая по август значительно превышало средне многолетние показатели. По данным метеостанции «Сухобузимское», максимальная влагообеспеченность была отмечена в мае-июне, тогда как в июле и августе сумма осадков составила 84 % от нормы.

Анализ микробиологических показателей образцов почвы проводили общепринятыми методами [13]. Оценивали количественные показатели эколого-трофических групп микроорганизмов: копиотрофов – на мясопептонном агаре; прототрофов – на крахмало-аммиачном агаре;

олиготрофов – на почвенном агаре; азотфиксаторов и олигонитрофилов – на агаре Эшби. Рассчитывали коэффициенты минерализации и олиготрофности. Численность почвенных микромицетов определяли на картофельно-декстрозном агаре. Посев почвенных суспензий производили в трехкратной повторности из разведений до 10⁶. Идентификацию микромицетов проводили на основании морфологических признаков [14]. Идентификацию чистых культур доминирующих бактерий проводили методом время-пролетной масс-спектрометрии с использованием масс-спектрометра MALDI-TOF MS Mic

roflex (Bruker Daltonics, Германия). Статистический анализ проводили с использованием пакетов программ Excel MS Office 2019, R версия 4.0.3 и RStudio версия 1.3.1093.

Результаты исследования и их обсуждение. Исследование микрофлоры почвы на опытных участках, проведенное в начале вегетационного периода (18–19 мая), выявило отличия в количестве и соотношении эколого-трофических групп микроорганизмов. Так, в почве Мининского стационара численность копиотрофов была в 18,8 раза выше, а микромицетов – в 6 раз выше, чем в почве учхоза «Миндерлинское» (табл. 3), в

то же время коэффициенты минерализации и олиготрофности не превышали 1,0 ед., что в совокупности с низкой численностью азотфиксаторов указывало на незавершенность процессов минерализации и высокое содержание доступных форм азота. Коэффициенты минерализации и олиготрофности в почве учхоза «Миндерлинское» были высокими и составили в среднем 1,85 и 2,30 ед. соответственно, что свидетельствовало о низком содержании доступных форм азота в почве. Такие показатели согласуются с данными о химическом составе почв обследуемых участков (см. табл. 1).

Таблица 3

Микробиологические показатели почвы опытных участков

Показатель	Район исследования	
	Учхоз «Миндерлинское»	Мининский стационар
Численность бактерий, 10 ⁶ КОЕ в 1 г почвы:		
копиотрофы	12,0±2,4	225,6±31,2
прототрофы	22,2±4,5	212,4±25,8
олиготрофы	27,6±5,4	186,6±30,6
азотфиксаторы	4,0±0,9	2,2±0,5
Численность микромицетов, 10 ³ КОЕ в 1 г почвы	49,2±7,2	297,0±66,0
Коэффициент минерализации, ед.	1,85±0,05	0,94±0,02
Коэффициент олиготрофности, ед.	2,30±0,01	0,82±0,03

В течение вегетационного периода 2020 г. характер флуктуаций численности микроорганизмов на обоих участках в разные месяцы отличался (рис. 1). На Мининском стационаре максимум численности бактериального и грибного сообществ приходился на начало августа, тогда как в почвах учхоза «Миндерлинское» максимум численности бактерий отмечали в конце августа (рис. 1, а), а микромицетов – в конце июня (рис. 1, б). Анализ выявил положительную корреляцию между численностью микромицетов и количеством осадков: коэффициенты корреляции составили 0,7 и 0,9 на участках Мининского стационара и учхоза «Миндерлинское» соответственно. При сравнительном анализе выявлены отличия и в таксономическом составе микробных сообществ. В почвенных образцах учхоза «Миндерлинское» до-

минировали грамположительные палочки – 76,2 %, из которых чаще всего встречались *Bacillus simplex* (23,8 %) и *Bacillus pumilus* (14,3 %). Среди грамотрицательных палочек преобладали *Pseudomonas kilonensis* (14,3 %). В почвах Мининского стационара грамположительные бактерии были также представлены преимущественно видами рода *Bacillus* (*B. pumilus* – 20,5 % и *B. safensis* – 19,3 %), однако доля грамотрицательных бактерий увеличилась до 45,5 %, в том числе *Pseudomonas mandelii* (28,4 %). Высокая частота встречаемости видов *Bacillus simplex* и *Pseudomonas spp.*, среди которых выявляют бактерии – деструкторы полигидроксиалканоатов, указывает на потенциальную способность аборигенной микрофлоры опытных участков к трансформации биополимеров этого класса.

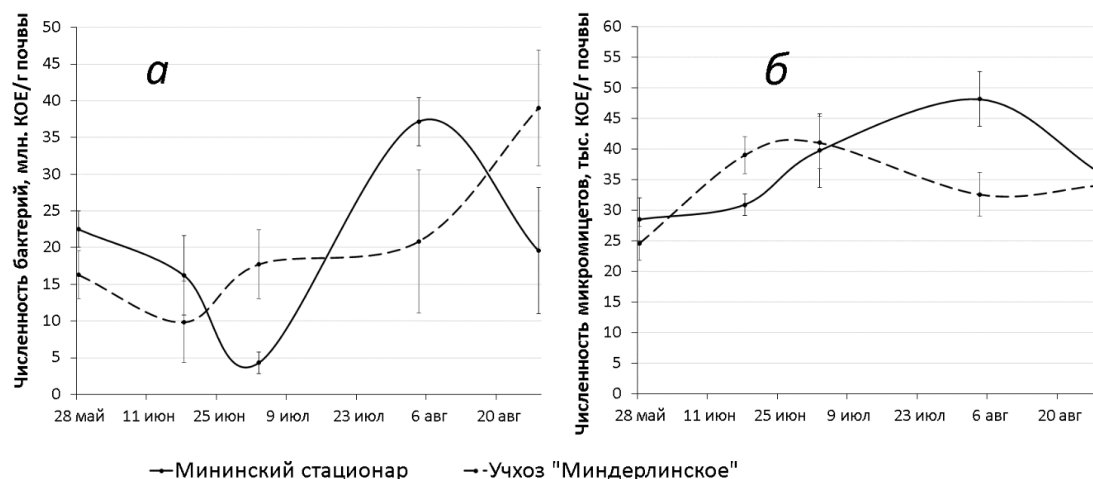


Рис. 1. Динамика численности почвенных бактерий (а) и микромицетов (б) за вегетационный период 2020 г.

Среди микромицетов на обоих участках были идентифицированы типичные представители. В почвах учхоза «Миндерлинское» доминировали виды рода *Penicillium* (27,5 %), *Trichoderma* (17,6 %) и *Fusarium* 15,7 %. В почвах Мининского стационара на первом месте также был *Penicillium* (42,6 %), доля видов *Trichoderma* была незначительная – всего 2,1 %, но на втором месте по численности были виды рода *Fusarium* (21,3 %), которые в совокупности с представителями рода *Alternaria* составляли высокий инфекционный фон почвы, достигающий 27,7 %.

Анализ таксономического разнообразия доминирующих представителей микроорганизмов в течение вегетационного периода, проведенный методом главных компонент, показал, что области значений частоты встречаемости разных видов формируют отдельные кластеры, соответствующие двум районам исследования.

Такое распределение указывает на достоверные различия в соотношении разных таксонов в почвах обследуемых участков опытных полей (рис. 2). В бактериальном сообществе первые две главные компоненты объясняют 64,34 % дисперсии. Наибольший вклад в первую компоненту вносят виды рода *Bacillus* (*B. simplex*, *B. marisflavi* и *B. pumilus*), ассоциированные с областью, соответствующей учхозу «Миндерлинское», а противоположный кластер формируют виды *P. mandelii*, *B. safensis*, *Rhodococcus erythropolis*, *Arthrobacter polychromogenes* и *Arthrobacter parietis*, распределившиеся в области Мининского стационара (рис. 2, а). Во вторую компоненту вносят наибольший вклад виды *Micrococcus luteus*, *Streptomyces avidinii* и *Streptomyces badius*, одинаково представленные на обоих участках.

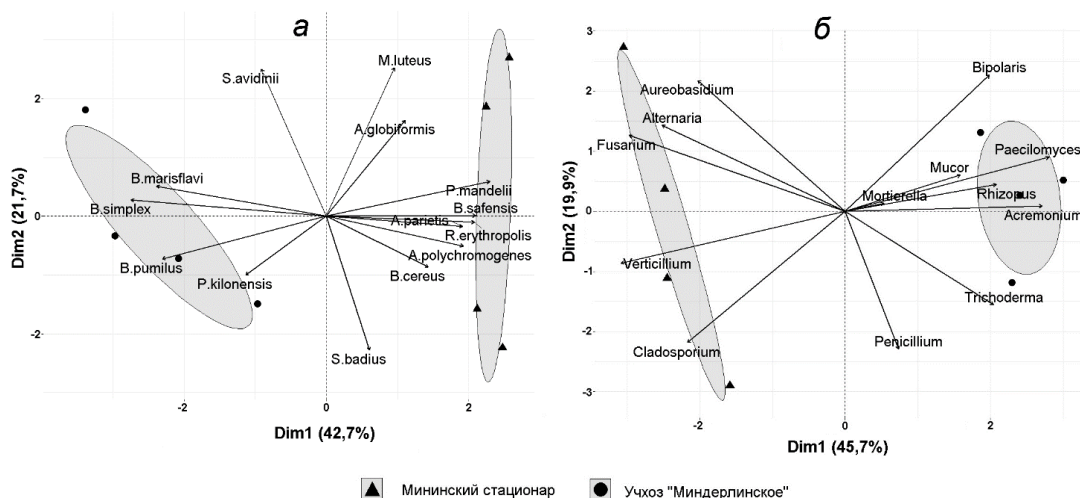


Рис. 2. Анализ главных компонент соотношения доминирующих бактерий (а) и микромицетов (б) в агрочерноземах опытных участков

В сообществе микромицетов первые две компоненты объясняют 65,58 % дисперсии. Большинство таксонов вносят относительно высокий вклад (0,61–0,93) в первую компоненту, за исключением родов *Penicillium*, *Mucor* и *Mortierella*, которые выявляются в большинстве почвенных проб обоих обследуемых участков (см. рис. 2, б). Представители родов *Verticillium*, *Fusarium* и *Alternaria*, проявляющие фитопатогенные свойства, распределились в области Мининского стационара, что может указывать на слабую супрессивность почв, обусловленную небольшой долей естественных видов-антагонистов из рода *Trichoderma* в сообществе микромицетов, по сравнению с почвой учхоза «Миндерлинское». В то же время в почвах Мининского стационара в течение вегетационного периода обнаруживались виды бактерий *R. erythropolis*, *A. polychromogenes*, *P. mandelii*, обладающие высоким катаболическим потенциалом и участвующие в биоремедиации почв и биотрансформации сложных органических соединений [12].

Выводы. Микробиологический анализ почвы опытных полей учхоза «Миндерлинское» и Мининского стационара, проведенный в течение вегетационного сезона 2020 г., выявил различия в численности микроорганизмов, связанные как с агрохимическими свойствами почвы, так и с погодными условиями сезона.

Почвы учхоза «Миндерлинское» обладают хорошими супрессивными свойствами, благодаря присутствию в популяции большой доли грибов-антагонистов из рода *Trichoderma* и низкому инфекционному фону фитопатогенных грибов *Fusarium* и *Alternaria*. Различия в таксономическом составе почвенных бактерий указывают на высокий потенциал почв Мининского стационара к деградации сложных органических соединений, в том числе полигидроксиалканоев, так как среди бактерий, обнаруженных в образцах почвы (*Bacillus safensis*, *Rhodococcus erythropolis*, *Arthrobacter polychromogenes*, *Pseudomonas mandelii*), есть виды, ранее описанные как ПГА-деструкторы, а также способные к биотрансформации ароматических углеводов и ксенобиотиков.

Литература

1. *Álvarez-Martín A., Hilton S.L., Bending G.D., Rodríguez-Cruz M.S., Sánchez-Martín M.J.* Changes in activity and structure of the soil microbial community after application of azoxystrobin or pirimicarb and an organic amendment to an agricultural soil // *Appl Soil Ecol.* 2016. 106. P. 47–57. DOI: 10.1016/j.apsoil.2016.05.005.
2. *Baćmaga M., Wyszowska J., Kucharski J.* The biochemical activity of soil contaminated with fungicides // *J Environ Sci Heal B.* 2019. 54(4). P. 252–262. DOI: 10.1080/03601234.2018.1553908.
3. *Алексеева А.А., Фомина Н.В.* Оценка воздействия фунгицидов на активность гидролитических почвенных ферментов // *Вестник КрасГАУ.* 2017. 3. С. 144–153.
4. *Meena R.S., Kumar S., Datta R. et al.* Impact of agrochemicals on soil microbiota and management: A review // *Land.* 2020. 9 (2). P. 34. DOI: 10.3390/land9020034.
5. *Santísima-Trinidad A.B.L., del Mar Montiel-Rozas M., Díez-Rojo M.Á., Pascual J.A., Ros M.* Impact of foliar fungicides on target and non-target soil microbial communities in cucumber crops // *Ecotox Environ Safe.* 2018. 166. P. 78–85. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.09.074.
6. *Baćmaga M., Kucharski J., Wyszowska J.* Microbiological and biochemical properties of soil polluted with a mixture of spiroxamine, tebuconazole, and triadimenol under the cultivation of *Triticum aestivum* L. // *Environ Monit Assess.* 2019. 191(7). P. 1–12. DOI: 10.1007/s10661-019-7539-4.
7. *Chen G., Cao L., Cao C. et al.* Effective and sustained control of soil-borne plant diseases by biodegradable polyhydroxybutyrate mulch films embedded with fungicide of prothioconazole // *Molecules.* 2021. 26 (3). P. 762. DOI: 10.3390/molecules26030762.
8. *Алехина Р.А., Славкина В.Э., Лопатина Ю.А.* Возможности применения биоразлагаемых полимерных материалов в аграрном секторе // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК.* 2020. № 67 (2). С. 115–120. DOI: 10.22314/2658-4859-2020-67-2-115-120.
9. *Rosseto M., Krein D.D., Balbé N.P., Dettmer A.* Starch–gelatin film as an alternative to the use of plastics in agriculture: a review // *Journal of the Science of Food and Agriculture.* 2019. 99 (15). P. 6671–6679. DOI: 10.1002/jsfa.9944.
10. *Liu B., Wang Y., Yang F., Wang X., Shen H., Cui H., Wu D.* Construction of a controlled-release delivery system for pesticides using biodegradable PLA-based microcapsules // *Colloid Surface B.* 2016. 144. P. 38–45. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2016.03.084.

11. Campos E.V.R., de Oliveira J.L., Fraceto L.F., Singh B. Polysaccharides as safer release systems for agrochemicals // *Agron Sustain Dev.* 2015. 35 (1). P. 47–66. DOI: 10.1007/s13593-014-0263-0.
12. Prudnikova S., Streltsova N., Volova T. The effect of the pesticide delivery method on the microbial community of field soil // *Environ Sci Pollut Res.* 2021. 28 (7). P. 8681–8697. DOI: 10.1007/s11356-020-11228-7.
13. Методы почвенной микробиологии и биохимии / под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ, 1991. 302 с.
14. Watanabe T. Pictorial atlas of soil and seed fungi. 2nd edition. CRC Press. 2002. 504 p.
6. Baćmaga M., Kucharski J., Wyszowska J. Microbiological and biochemical properties of soil polluted with a mixture of spiroxamine, tebuconazole, and triadimenol under the cultivation of *Triticum aestivum* L. // *Environ Monit Assess.* 2019. 191(7). P. 1–12. DOI: 10.1007/s10661-019-7539-4.
7. Chen G., Cao L., Cao C. et al. Effective and sustained control of soil-borne plant diseases by biodegradable polyhydroxybutyrate mulch films embedded with fungicide of prothioconazole // *Molecules.* 2021. 26 (3). P. 762. DOI: 10.3390/molecules26030762.
8. Alehina R.A., Slavkina V. E., Lopatina Yu.A. Vozможности primeneniya biorazlagaemykh polimernykh materialov v agrarnom sektore // `Elektrotehnologii i `elektrooborudovanie v APK. 2020. № 67 (2). S. 115–120. DOI: 10.22314/2658-4859-2020-67-2-115-120.
9. Rosseto M., Krein D.D., Balbé N.P., Dettmer A. Starch–gelatin film as an alternative to the use of plastics in agriculture: a review // *Journal of the Science of Food and Agriculture.* 2019. 99 (15). P. 6671–6679. DOI: 10.1002/jsfa.9944.
10. Liu B., Wang Y., Yang F., Wang X., Shen H., Cui H., Wu D. Construction of a controlled-release delivery system for pesticides using biodegradable PLA-based microcapsules // *Colloid Surface B.* 2016. 144. P. 38–45. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2016.03.084.
11. Campos E.V.R., de Oliveira J.L., Fraceto L.F., Singh B. Polysaccharides as safer release systems for agrochemicals // *Agron Sustain Dev.* 2015. 35 (1). P. 47–66. DOI: 10.1007/s13593-014-0263-0.
12. Prudnikova S., Streltsova N., Volova T. The effect of the pesticide delivery method on the microbial community of field soil // *Environ Sci Pollut Res.* 2021. 28 (7). P. 8681–8697. DOI: 10.1007/s11356-020-11228-7.
13. Metody pochvennoj mikrobiologii i biohimii / pod red. D.G. Zvyaginseva. M.: Izd-vo MGU, 1991. 302 s.
14. Watanabe T. Pictorial atlas of soil and seed fungi. 2nd edition. CRC Press. 2002. 504 p.

References

1. Álvarez-Martín A., Hilton S.L., Bending G.D., Rodríguez-Cruz M.S., Sánchez-Martín M.J. Changes in activity and structure of the soil microbial community after application of azoxystrobin or pirimicarb and an organic amendment to an agricultural soil // *Appl Soil Ecol.* 2016. 106. P. 47–57. DOI: 10.1016/j.apsoil.2016.05.005.
2. Baćmaga M., Wyszowska J., Kucharski J. The biochemical activity of soil contaminated with fungicides // *J Environ Sci Heal B.* 2019. 54(4). P. 252–262. DOI: 10.1080/03601234.2018.1553908.
3. Alekseeva A.A., Fomina N.V. Ocenka vozdejstviya fungicidov na aktivnost' gidroliticheskikh pochvennykh fermentov // *Vestnik KrasGAU.* 2017. 3. S. 144–153.
4. Meena R.S., Kumar S., Datta R. et al. Impact of agrochemicals on soil microbiota and management: A review // *Land.* 2020. 9 (2). P. 34. DOI: 10.3390/land9020034.
5. Santísima-Trinidad A.B.L., del Mar Montiel-Rozas M., Díez-Rojo M.Á., Pascual J.A., Ros M. Impact of foliar fungicides on target and non-target soil microbial communities in cucumber crops // *Ecotox Environ Safe.* 2018. 166. P. 78–85. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.09.074.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации Сибирскому федеральному университету на 2020 год (№ FSRZ-2020-0006).