

**Агрочоведение и агроэкология**

УДК 546.562:576.851:633.11

DOI 10.31857/S2500262724030121 EDN FUUQZG

**ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ СОЕДИНЕНИЙ МЕДИ В ЗАГРЯЗНЕННОЙ МЕТАЛЛОМ ПОЧВЕ И ЕГО НАКОПЛЕНИЕ В РАСТЕНИЯХ ПРИ ВНЕСЕНИИ РОСТОСТИМУЛИРУЮЩИХ РИЗОСФЕРНЫХ БАКТЕРИЙ**© 2024 г. **В. П. Шабаяев**<sup>1</sup>, доктор биологических наук, **М. П. Волокитин**<sup>2</sup>, кандидат сельскохозяйственных наук, **В. Е. Остроумов**<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
142290, Московская обл., Пушкино, ул. Институтская, 2  
E-mail: vpsh@rambler.ru<sup>2</sup>Институт фундаментальных проблем биологии РАН,  
142290, Московская обл., Пушкино, ул. Институтская, 2

Исследования проводили с целью изучения влияния внесения ростостимулирующих ризосферных бактерий рода *Pseudomonas* при искусственном загрязнении агросерой почвы медью в концентрации выше ориентировочно допустимого уровня на фракционный состав соединений металла в почве, массу растений яровой пшеницы и усвоение ими металла в вегетационном опыте. Для оценки влияния бактерий на распределение меди по почвенным фракциям использовали инокуляцию культурами *P. fluorescens* 20, *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23. Пшеницу выращивали до фазы трубкования при загрязнении почвы  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  в дозе  $\text{Cu}$  300 мг/кг на фоне внесения NPK удобрений. Аккумуляцию  $\text{Cu}$  наблюдали во фракциях, связанных с органическим веществом, оксидами и гидроксидами  $\text{Fe}$  и  $\text{Mn}$  и в меньшей степени с карбонатами. Содержание меди в вегетативной массе и корнях после озоления в смеси  $\text{HNO}_3$ :  $\text{HClO}_4$  (2:1) и в почвенных фракциях определяли методом эмиссионно-оптической спектроскопии индуктивно-связанной плазмы. Бактерии повышали устойчивость растений к высокой концентрации меди и на 13...24 % увеличивали их массу, уменьшая фитотоксичность металла. Положительное действие бактерий при загрязнении медью обусловлено ростом содержания металла в корнях (в 18...19 раз относительно варианта с загрязнением без применения бактерий). Внесение микроорганизмов повышало содержание меди в почве главным образом в специфически сорбированной и связанной с карбонатами фракциях, а также в составе железистых минералов, и в меньшей мере – в органической фракции, одновременно уменьшая содержание металла в остаточной фракции. Увеличивая содержание меди в вегетативных органах растений и усвоение ими металла из почвы, бактерии усиливали фитоэкстракцию – очистку загрязненной почвы. Рост усвоения меди растениями из почвы на 19...30 % при внесении микроорганизмов соответствовал увеличению ее нахождения в почве в относительно подвижных формах и уменьшению в остаточной фракции.

**FRACTIONAL COMPOSITION OF COPPER COMPOUNDS IN METAL-CONTAMINATED SOIL AND ITS ACCUMULATION IN PLANTS IN APPLICATION OF GROWTH PROMOTING RHIZOSPHERE BACTERIA****V. P. Shabayev**<sup>1</sup>, **M. P. Volokitin**<sup>2</sup>, **V. E. Ostroumov**<sup>1</sup><sup>1</sup>Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Russian Academy of Sciences,  
142290, Moskovskaya obl., Pushchino, ul. Institutskaya, 2  
E-mail: vpsh@rambler.ru<sup>2</sup>Institute of Basic Biological Problems, Russian Academy of Sciences,  
142290, Moskovskaya obl., Pushchino, ul. Institutskaya, 2

Studies were carried out to investigate effect of application of growth-promoting rhizosphere bacteria of genus *Pseudomonas* in artificial contamination of agro-gray soil with copper in concentration above approximately permissible level on fractional composition of metal compounds in soil, weight of spring wheat plants and metal uptake by plants in pot experiment. To assess effect of bacteria on distribution of copper in soil fractions, inoculation with cultures *P. fluorescens* 20, *P. fluorescens* 21, and *P. putida* 23 was used. Wheat plants were grown up to booting stage in contamination with  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  at rate of 300 mg Cu/kg of soil against background of NPK fertilization. Cu accumulation in fractions associated with organic matter, oxides and hydroxides of  $\text{Fe}$  and  $\text{Mn}$  and, to a lesser extent, with carbonates was established. Content of Cu in shoots and roots after combustion in mixture of  $\text{HNO}_3$ :  $\text{HClO}_4$  (2:1) and in soil fraction was determined by inductively coupled plasma emission-optical spectrometry. Bacteria rised plant resistance to high copper concentration and increased their weight by 13...24 %, reducing the phytotoxicity of metal. Positive effect of bacteria in copper contamination is due to increase in content of metal in roots (in 18...19 times relative to variant with copper contamination without bacteria application). Bacteria increased copper content mainly in specifically sorbed fraction associated with carbonates and in composition of ferruginous minerals, to lesser extent in organic fraction and decreased content of metal in residual fraction. Growth in copper uptake by plants from the soil by 19...30 % in application of bacteria corresponded to increase in its presence in soil in relatively mobile forms and decrease in the residual fraction.

**Ключевые слова:** *Pseudomonas*, яровая пшеница, агросерая почва, медь азотнокислая, медь в растениях и почвенных фракциях.

**Keywords:** *Pseudomonas*, spring wheat, agro-gray soil, cooper nitrate, cooper in plants and soil fractions.

Медь (Cu) выступает одним из биологически значимых и необходимых элементов для растений, однако при повышенных концентрациях может оказывать токсиче-

ское действие [1]. Биоремедиация токсичных тяжелых металлов (ТМ) вызывает значительный и растущий интерес, поскольку это экологически безопасный и эф-

фективный метод восстановления окружающей среды, загрязненной ТМ, с использованием внутренних биологических механизмов микроорганизмов и растений [2]. Для ремедиации загрязненных ТМ почв и повышения продуктивности сельскохозяйственных культур исследуются стимулирующие рост растений ризосферные бактерии (plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR) [3, 4]. Представители PGPR рода *Pseudomonas* привлекают особое внимание благодаря широкой распространенности и присущим им ряду полезных для растений свойств [3, 5]. Сообщается, что *Pseudomonas* обладают высокой устойчивостью к ТМ и имеют высокий биоремедиационный потенциал, в том числе в ассоциациях с различными видами растений [6]. Применение PGPR рода *Pseudomonas* существенно уменьшало фитотоксичность и повышало устойчивость растений к токсическому действию различных ТМ [7, 8]. Установлены значительная стимуляция роста растений подсолнечника и увеличение поглощения Си вегетативной биомассой и корнями после инокуляции бактерией *P. lurida* штаммом EOO26 на фоне загрязнения почвы  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  [1]. Применение ростостимулирующей ризосферной бактерии *P. thivervalensis* улучшило параметры роста растений рапса (*Brassica napus* L.), в том числе увеличило биомассу и потребление Си растениями на загрязненной металлом почве [9]. В последние годы, несмотря на то, что имеются многочисленные данные, свидетельствующие о значительной стимуляции роста растений под влиянием PGPR, исследований по изучению растительных и в особенности почвенных механизмов ремедиации загрязненных ТМ почв, в том числе Си, под влиянием этих бактерий проведено относительно недостаточно.

Цель исследований – изучение влияния внесения PGPR рода *Pseudomonas* на фракционный состав соединений Си в почве, массу растений яровой пшеницы и усвоение Си растениями при их выращивании на загрязненной ТМ в повышенной концентрации агросерой почве.

**Методика.** Исследования проводили при выращивании яровой пшеницы *T. aestivum* L. сорта Злата (ФИЦ «Немчиновка») в вегетационном опыте при искусственном загрязнении  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  пахотной среднесуглинистой агросерой почвы (слой 0...20 см) юга Московской области. В сосудах, содержащих 800 г почвы, выращивали по 9 растений до фазы трубкования в течение 27 дней. В контрольном варианте растения выращивали в почве без внесения меди и без инокуляции бактериями. Вариант с внесением меди без бактерий рассматривали для оценки влияния загрязнения почвы на распределение металла по почвенным фракциям и на ее усвоение растениями. В почву вносили Си из расчета 300 мг/кг, что в 2,3 раза превышало ориентировочно допустимую концентрацию (ОДК) для аналогичных почв. С этой солью было внесено 106 мг N/сосуд, поэтому в контрольном варианте (без внесения  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  и бактерий) применяли азот в виде  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  в такой же дозе, какая была использована в загрязненных вариантах. То есть, доза азота была выровнена во всех вариантах опыта, растения выращивали на фоне внесения РК-удобрений в виде однозамещенного фосфорнокислого калия и сернокислого калия по 106 мг действующего вещества/сосуд, исходя из соотношения N : P : K = 1:1:1. Для изучения влияния бактерий на распределение металла по фракциям в почве использовали варианты с внесением металла в почву и с инокуляцией бактериями штаммов *P. fluorescens* 20, *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23. Поступление металла в растения и их рост рассматривали в вариантах с внесением металла в почву без бактериальной инокуляции.

При посеве стерилизованные семена инокулировали суспензиями бактерий из расчета  $10^8$  клеток на растение. В вариантах без инокуляции бактериями применяли автоклавированные бактериальные суспензии. Влажность почвы в течение роста растений поддерживали не ниже 60 % полной полевой влагоемкости (21 % мас. %).

Вегетативную массу (листья и стебли) после среза растений высушивали при 70 °С, взвешивали и озоляли (0,5 г) в смеси концентрированных кислот  $\text{HNO}_3$  :  $\text{HClO}_4$  (2:1). В почве фракционировали соединения Си методом последовательных селективных экстракций. Выделяли следующие фракции Си: водорастворимую; обменную (экстрагент – 0,05 М  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ); специфически сорбированную, связанную с карбонатами (2,5 %  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ); связанную с органическим веществом (0,1  $\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ); связанную с железистыми минералами (реактив Тамма при ультрафиолетовом облучении). Содержание Си в остаточной фракции, прочно связанной с глинистыми минералами, устанавливали по разности между внесенным в почву количеством металла и его суммой в выделенных фракциях. Концентрация меди в растворах, полученных при последовательной экстракции из почвы, а также в растворах озоленных растительных препаратов измеряли методом эмиссионно-оптической спектроскопии индуктивно-связанной плазмы на спектрометре ICP-OES 5110 (Agilent, США). Статистическую обработку полученных данных проводили, используя функции F.TEST (оценка вероятности сходства выборок), ДОВЕРИТ.NORM (определение доверительного интервала для среднего при нормальном распределении), КВАДРОТКЛ (оценка отклонений точек от среднего) и NORM.PACП (оценка нормального распределения) пакета MS Excel 2010.

**Результаты и обсуждение.** Анализ распределения по фракциям показал, что медь находится во всех выделенных фракциях почвы примерно через месяц после выращивания растений (табл. 1). В модельном эксперименте при внесении  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  в дерново-подзолистую почву и чернозем медь была представлена во всех фракциях, выделенных аналогичным использованным в наших исследованиях методом [10].

**Табл. 1. Фракционный состав соединений Си в почве при внесении бактерий на фоне загрязнения почвы металлом**

Вариант	Водорастворимая	Обменная	Специфически сорбированная	Связанная		Остаточная
				с органическим веществом	с железистыми минералами	
Cu без внесения бактерий	0,6±0,08 0,2±0,07	0,7±0,10 0,2±0,03	26,0±3,2 8,7±1,2	102,3±15,0 34,1±5,1	40,9±5,9 13,6±1,7	123,5±18,0 43,2±6,4
Cu + <i>P. fluorescens</i> 20	0,9±0,13 0,3±0,04	0,5±0,07 0,2±0,03	37,8±5,5 12,6±1,6	113,0±14,8 37,7±5,2	101,7±15,0 33,9±4,9	46,1±6,7 15,3±2,1
Cu + <i>P. fluorescens</i> 21	0,9±0,12 0,3±0,03	0,4±0,06 0,1±0,01	36,1±5,4 12,0±1,6	119,8±17,1 39,9±5,6	74,2±11,0 24,7±3,5	68,6±10,1 23,0±2,9
Cu + <i>P. putida</i> 23	0,9±0,12 0,3±0,04	0,4±0,06 0,1±0,01	37,0±5,5 12,3±1,7	131,9±19,0 44,0±6,6	56,1±8,2 18,7±2,5	73,7±10,3 24,6±3,5

\*в числителе – мг/кг почвы, в знаменателе – % от внесенного количества.

В водорастворимой и обменной фракциях во всех вариантах содержалась незначительная доля металла – 0,1...0,3 % от внесенного количества. Медь аккумуляровалась вне зависимости от применения бактерий, главным образом во фракции, связанной с органическим веществом (34,1...44,0 %), и фракции, связанной

с оксидами и гидроксидами Fe и Mn (13,6...33,9 %), и в меньшей степени – в специфически сорбированной фракции, связанной с карбонатами (8,7...12,6 %). На примере дерново-подзолистой почвы и чернозема показано, что для Cu характерно большое сродство к органическому веществу при загрязнении азотнокислой медью [10]. В остаточной фракции, связанной с глинистыми минералами, было сосредоточено 15,3...43,2 % ТМ.

Внесение бактерий оказало существенное влияние на распределение в почве Cu. Под влиянием бактерий *P. fluorescens* 20 и *P. fluorescens* 21 обнаружено увеличение в 1,8...2,5 раза содержания ТМ во фракции, связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn, в варианте с *P. putida* 23 величина этого показателя увеличилась в 1,4 раза. Кроме того, внесение бактерий способствовало увеличению содержания меди в специфически сорбированной фракции, связанной с карбонатами, в 1,4...1,5 раза. Бактерии достоверно увеличили содержание Cu во фракции, связанной с органическим веществом – на 11...29 %. Вследствие всех этих изменений в вариантах с бактериями содержание меди в остаточной фракции уменьшилось с 43,2 % до 15,3...24,6 % от внесенного количества и составило 37...60 % по отношению к варианту без применения бактерий. То есть, при внесении бактерий значительная часть металла после выращивания пшеницы до фазы трубкования сосредотачивалась в относительно подвижных формах, при этом уменьшаясь в остаточной фракции.

При загрязнении почвы Cu установлено значительное ингибирование роста яровой пшеницы (табл. 2). Это выразилось в уменьшении на 13...24 % массы вегетативных органов и целых растений относительно контроля – без загрязнения ТМ и бактериальных инокуляций. Применение бактерий уменьшило токсическое действие Cu и стимулировало рост растений. При внесении бактерий вегетативная масса растений, подвергнутых Cu-стрессу, была на 13...16 % больше, в сравнении с вариантом с загрязнением ТМ без бактериальных инокуляций. Бактерии при загрязнении Cu также способствовали лучшему росту корневой системы – масса корней увеличилась на 20...24 %.

**Табл. 2. Масса растений яровой пшеницы при внесении бактерий на фоне загрязнения почвы медью (сухое вещество), г/сосуд**

Вариант	Вегетативная масса	Корни	Целое растение
Без внесения Cu и бактерий – контроль	2,65	0,61	3,26
Cu без внесения бактерий	2,01	0,41	2,42
Cu + <i>P. fluorescens</i> 20	2,32	0,50	2,82
Cu + <i>P. fluorescens</i> 21	2,28	0,49	2,77
Cu + <i>P. putida</i> 23	2,33	0,51	2,84
HCP <sub>05</sub>	0,26	0,08	0,34

Загрязнение Cu почвы вне зависимости от внесения бактерий до полутора раз увеличило содержание ТМ в вегетативной массе (табл. 3).

При загрязнении почвы Cu величина этого показателя в корневой системе увеличилась в значительно большей степени, чем в вегетативной массе. В варианте без внесения бактерий содержание Cu в корнях увеличилось в 17 раз, при внесении бактерий – в 18...19 раз по сравнению с контролем. Относительно варианта с загрязнением Cu без бактерий содержание ТМ в корнях при инокуляции *P. fluorescens* 20 увеличилось на 14 %, при применении *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23 – в виде тенденции – на 10...11 %. Применение бактерий в загрязненных условиях увеличило усвоение или вынос металла (в мкг/сосуд) из почвы вегетативной массой на 17...30 %, в наибольшей степени – в варианте с *P. fluorescens* 21, в сравнении

**Табл. 3. Содержание в растениях и усвоение Cu растениями при внесении бактерий на фоне загрязнения почвы металлом**

Вариант	Содержание Cu в растениях, мг/кг		Усвоение Cu растениями, мкг/сосуд	
	вегетативная масса	корни	вегетативная масса	корни
Без внесения Cu и бактерий – контроль	11	24	29	15
Cu без внесения бактерий	15	399	30	164
Cu + <i>P. fluorescens</i> 20	15	456	35	263
Cu + <i>P. fluorescens</i> 21	17	441	39	255
Cu + <i>P. putida</i> 23	15	440	35	259
HCP <sub>05</sub>	2	74	4	31

с загрязнением ТМ без бактерий (табл. 3). То есть, внесение бактерий усилило фитоэкстракцию – очистку загрязненной почвы. Под влиянием бактерий усвоение Cu корнями в загрязненных условиях увеличилось в 1,5...1,6 раза. Усвоение Cu корнями вне зависимости от внесения бактерий было в 6...8 раз больше, чем вегетативной массой из-за его более высокого содержания.

Увеличение усвоения Cu вегетативной массой и корневой системой инокулированных бактериями рода *Pseudomonas* растений, вероятно, было обусловлено увеличением подвижности в почве металла, о чем свидетельствуют уменьшение его доли и содержания в остаточной фракции и повышенное содержание в почве в других формах, кроме водорастворимой и обменной фракций. PGPR способны влиять на подвижность в почве и биодоступность металлов через процессы подкисления, комплексообразования, осаждения и окислительно-восстановительные реакции [11, 12]. Продуцирование PGPR ряда веществ, в том числе сидерофоров – низкомолекулярных органических соединений, также переводит ТМ в растворимые и биодоступные формы и наряду с другими полезными свойствами ризобактерий стимулирует рост растений и уменьшает неблагоприятное действие ТМ [11, 12, 13]. Так, установлено, что дитиокарбоновая кислота – сидерофор, продуцируемый *Pseudomonas* spp., образует растворимые комплексы с Cr, Cu, Fe, Mn, Ni и Zn, но осаждает из раствора Cd, Pb и As [13]. Повышенное содержание Cu в почве в составе вышеупомянутых фракций, при внесении всех бактерий, вероятно, связано с продуцированием бактериальных сидерофоров, которые образуют растворимые комплексы с Cu. Бóльшее усвоение Cu растениями при применении бактерий, а, следовательно, усиление фитоэкстракции, было обусловлено тем, что значительная часть меди сосредотачивалась в относительно подвижных формах, уменьшаясь в остаточной фракции и, вероятно, вследствие этого, увеличением подвижности и биодоступности металла.

Повышение устойчивости растений яровой пшеницы к токсическому действию меди и усиление фитоэкстракции при применении PGPR имеет не только теоретическое, но и большое практическое значение. Впервые показано, что бактерии не только повышают продуктивность загрязненных растений. Учитывая то, что, вне зависимости от формы поступления техногенных соединений ТМ, Cu в загрязненных почвах локализуется в основном в труднодоступных формах [15], бактерии переводят медь в более подвижные формы и, увеличивая фитоэкстракцию, уменьшают ее содержание в почве, тем самым, способствуют очистке почвы. Кроме того, при дефиците подвижной меди в почве с достаточно высоким валовым содержанием микроэлемента, ее поступление в растения из почвы во многом определяется активностью почвенных микроорганизмов [16], и применение

исследованных бактерий будет способствовать увеличению продуктивности сельскохозяйственных культур.

**Выводы.** Внесение PGPR рода *Pseudomonas* обеспечило повышение устойчивости яровой пшеницы к высокой концентрации Си в почве и увеличение массы растений, значительно уменьшая фитотоксичность металла. Положительное действие бактерий при загрязнении почвы Си было обусловлено увеличением содержания и накопления ТМ в корнях – ответной протекторной реакцией растений на загрязнение почвы. Внесение бактерий повышало усвоение ТМ вегетативной массой из почвы, тем самым, усиливая фитоэкстракцию – очистку почвы от загрязнения и улучшая ремедиацию загрязненной почвы. Под влиянием бактерий содержание Си в почве возросло главным образом в специфически сорбированной и связанной с железистыми минералами фракциях, в меньшей мере – в органической фракции, одновременно содержание металла в остаточной фракции уменьшилось. Увеличение усвоения Си растениями при внесении бактерий обусловлено тем, что значительная часть металла переходила в относительно более подвижные формы, вследствие этого, вероятно, увеличилась его биодоступность.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств бюджета в рамках государственных заданий Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН 121041500050-3 (60 % затрат), 121040500038-3 (20 % затрат) и Института фундаментальных проблем биологии РАН 122041200035-2 (20 % затрат).

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы этой работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### БЛАГОДАРНОСТИ.

Авторы выражают благодарность д.с.-х.н. Н. В. Давыдовой, ФИЦ «Немчиновка» за предоставление высококачественных семян для проведения опыта.

#### Литература.

1. Bioaugmentation with copper tolerant endophyte *Pseudomonas lurida* strain EOO26 for improved plant growth and copper phytoremediation by *Helianthus annuus* / A. Kumar, Tripti, O. Voropaeva, et al. // *Chemosphere*. 2021. 266. P. 128983. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653520331805?via%3Dihub> (дата обращения: 14.02.2024). doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128983.
2. Ojha A., Jaiswal S., Mishra S. Bioremediation techniques for heavy metal and metalloid removal from polluted lands: a review // *International Journal of Science and Technology*. 2022. Vol. 10. P. 10591–10612. doi: 10.1007/s13762-022-04502-3.
3. Dorjey S., Dolkar D., Sharma R. Plant growth promoting rhizobacteria *Pseudomonas* // *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017. Vol. 7. P. 1335–1344. doi: 10.20546/ijcmas.2017.607.160.
4. Recent progress on emerging technologies for trace elements-contaminated soil remediation. Review. T. El. Rasafi, A. Haouas, A. Tallou, et al. // *Chemosphere*. 2023. Vol. 341. P. 140121. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37690564/> (дата обращения: 12.03.2024). doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.140121.
5. Role of rhizobacteria in phytoremediation of heavy metals. Review Article / N. Nadeem, R. Asif, S. Ayyub, et al. // *Biological and Clinical Sciences Research Journal*. 2020. e035. URL: <https://bcsrj.com/ojs/index.php/bcsrj/article/view/35> (дата обращения: 21.11.2023). doi: 10.47264/bcsrj0101035.
6. Recent developments in microbe-plant-based bioremediation for tackling heavy metal-polluted soils: Review Article / L. Saha, J. Tiwari, K. Baudh, et al. // *Frontiers in Microbiology*. 2021. Vol. 12. 723. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35002995/> (дата обращения: 14.02.2024). doi: 10.3389/fmicb.2021.731723.
7. Шабаев В. П., Бочарникова Е. А., Остроумов В. Е. Ремедиация загрязненной кадмием почвы при применении стимулирующих рост растений ризобактерий и природного цеолита // *Почвоведение*. 2020. № 6. С. 738–750. doi: 10.31857/S0032180X20060118.
8. Шабаев В. П., Остроумов В. Е. Почвенно-агрохимические аспекты ремедиации загрязненной никелем почвы при применении ростстимулирующих ризосферных бактерий // *Почвоведение*. 2023. № 2. С. 226–239. doi: 10.31857/S0032180X22600925.
9. Effects of plant growth-promoting bacteria (PGPB) inoculation on the growth, antioxidant activity, Cu uptake, and bacterial community structure of rape (*Brassica napus* L.) grown in Cu-contaminated agricultural soil / X. M. Ren, S. J. Guo, W. Tian, et al. // *Frontiers in Microbiology*. 2019. Vol. 10. 1–12. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2019.01455/full> (дата обращения: 12.12.2023). doi: 10.3389/fmicb.2019.01455.
10. Ладонин Д. В., Карпунин М. М. Фракционный состав соединений никеля, меди, цинка и свинца, загрязненных оксидами и растворимыми солями металлов // *Почвоведение*. 2011. № 8. С. 953–965.
11. Phytoremediation of heavy metals assisted by plant growth promoting (PGP) bacteria: A review / A. Ullah, S. Heng, M. F. H. Munis, et al. // *Environmental and Experimental Botany*. 2015. Vol. 117. P. 28–40. doi: 10.1016/j.envexpbot.2015.05.001.
12. Mishra J., Singh R., Arora N. K. Alleviation of heavy metal stress in plants and remediation of soil by rhizosphere microorganisms. Mini review article. Sec. Microbial Symbioses // *Frontiers in Microbiology*. 2017. Vol. 8. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2019.01455/full> (дата обращения: 19.03.2023). doi: 10.3389/fmicb.2017.01706.2019.01455/full.
13. Srivastava R., Singh A. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) for sustainable agriculture // *International Journal of Agricultural Science and Research*. 2017. Vol. 7. P. 505–510.
14. Antimicrobial properties of pyridine-2,6-dithiocarboxylic acid, metal chelator produced by *Pseudomonas* spp. / A. L. Sebat, A. J. Pasczynski, M. S. Cortese, et al. // *Applied and Environmental Microbiology*. 2001. Vol. 67. P. 3934–3942. doi: 10.1128/AEM.67.9.3934-3942.2001.
15. Ладонин Д. В. Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах. М.: Издательство Московского университета, 2019. 312 с.
16. Макро- и микроэлементы в почвах и кормовых травах прифермерских полей Барнаульского Приобья / А. И. Сысо, М. А. Лебедева, С. А. Худяев и др. // *Вестник Новосибирского государственного аграрного университета* 2017. № 3. С. 54–61.

Поступила в редакцию 27.02.2024  
После доработки 18.03.2024  
Принята к публикации 21.05.2024