

## РОСТ И МИНЕРАЛЬНОЕ ПИТАНИЕ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ ПРИ ВНЕСЕНИИ РОСТСТимулирующей РИЗОСФЕРНОЙ БАКТЕРИИ В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ НИКЕЛЕМ\*

**В.П. Шабаяев**, доктор биологических наук  
**В.Е. Остроумов**, старший научный сотрудник

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
142290, Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 2  
E-mail: VPSH@rambler.ru*

*В вегетационном опыте изучено влияние стимулирующей рост растений ризосферной бактерии *Pseudomonas fluorescens* 20 на урожай яровой пшеницы при искусственном загрязнении агросерой почвы водорастворимым соединением никеля. Растения выращивали до фазы выхода в трубку на фоне внесения NPK-удобрений и  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  из расчета 300 мг Ni/kg почвы, что значительно превышает предельно допустимую концентрацию элемента в почве. Изучали химический состав растений, а также вынос из почвы никеля и питательных элементов вегетативной массой и корнями. Содержание Ni и других зольных элементов определяли методами эмиссионно-оптической спектроскопии индуктивно-связанной плазмы и пламенной фотометрии после мокрого озоления растительного материала. Содержание азота в растениях устанавливали феноловым методом. При внесении бактерии устойчивость растений к токсическому действию тяжелого металла возрастала, что выражалось в увеличении массы вегетативных органов и корней в загрязненных условиях. Одновременно улучшалось минеральное питание яровой пшеницы, которое сопровождалось увеличением выноса питательных элементов из почвы растениями, что, вероятно, обусловлено их ответной протекторной реакцией на загрязнение почвы Ni. Это происходило вследствие стимуляции роста инокулированных бактериями растений, в целом без значимых изменений содержания элементов в вегетативной массе и корнях. Использование бактерии усиливало процесс фитоэкстракции (очистки почвы от тяжелого металла) и вынос никеля корнями без значимых изменений его концентрации в вегетативной массе и корнях. Корни аккумулировали на порядок больше металла, чем вегетативная масса. Загрязнение почвы Ni, независимо от бактериальной инокуляции, увеличивало содержание Mg и ряда других питательных элементов в вегетативной массе и корнях растений.*

## GROWTH AND MINERAL NUTRITION OF SPRING WHEAT UNDER APPLICATION OF PLANT GROTH-PROMOTING RHIZOBACTERIUM IN CONDITIONS OF SOIL CONTAMINATION WITH NICKEL

Shabayev V.P., Ostroumov V.E.

*Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Russian Academy of Sciences,  
142290, Pushchino, Moskovskaya obl., ul. Institutskaya, 2  
E-mail: VPSH@rambler.ru*

*Influence of plant growth-promoting rhizobacterium *Pseudomonas fluorescens* 20 on the yield of spring wheat under artificial contamination of agro-gray soil with a water-soluble nickel compound was studied in pot experiment. Plants were grown up to the booting stage against the background of NPK fertilizers and  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  at the rate of 300 mg Ni/kg soil, significantly exceeding the maximum permissible concentration of the element in soil. Elemental chemical composition of plants and uptake of nickel and nutrients from soil by shoots and roots were studied. Concentration of Ni and other ash elements, except potassium in shoots and roots were determined respectively by the methods of emission-optical spectroscopy of inductively coupled plasma and flame photometry after wet combustion of plant material. N content in plants was determined by phenol method. Increase in plant resistance to toxic effect of heavy metal, which was expressed in increase in the mass of shoots and roots in contaminated conditions was found when applied bacterium. Under inoculation with bacterium improvement in mineral nutrition of spring wheat – increase in nutrient uptake from soil by plants, which was probably due to their response to soil contamination with Ni was established. This was due to growth promotion of bacterially-inoculated plants, in general, without significant changes in content of elements in shoots and roots. Application of bacterium increased Ni uptake by shoots from soil – it enhanced the process of phytoextraction (cleaning soil from heavy metal) and element uptake by roots without significant changes in its concentration in shoots and roots. An order of magnitude more metal was accumulated in roots than in shoots. Soil contamination with Ni, regardless of bacterial inoculation, increased the content of Mg and a number of other nutrients in shoots and roots of plants.*

**Ключевые слова:** *Pseudomonas fluorescens* 20, *Triticum aestivum* L.,  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , агросерая почва, химический состав растений

**Key words:** *Pseudomonas fluorescens* 20, *Triticum aestivum* L.,  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , agrogray soil, chemical composition of plants

Основные антропогенные источники загрязнения биосферы Ni – сжигание топлива, поступление из разных отраслей промышленности, осадки сточных вод и свалки. В сельском хозяйстве источником загрязнения почвы Ni могут быть минеральные и органические удобрения, а также средства защиты растений. При повы-

шенном содержании Ni в почве происходит угнетение роста и развития растений, снижается содержание хлорофилла в листьях [1]. В качестве одной из стратегий ремедиации загрязненных тяжелыми металлами почв многие исследователи рассматривают возможность использования стимулирующих рост растений ризосфер-

\*Работа выполнена в рамках госзадания Физико-химические и биогеохимические процессы в антропогенно измененных почвах ААА-А-А18-118013190180-9 и ААА-А18-118013190181-6.

Авторы благодарят ЦКП ИФХиБПП РАН за определение зольных элементов в растворах.

ных бактерий (PGPR) [2, 3, 4]. При этом особое внимание из-за широкой распространенности и наличия совокупности полезных для растений свойств уделяют представителям рода *Pseudomonas* [5]. Биопрепараты, включающие бактерии этого рода, наиболее эффективно улучшали такие ростовые показатели различных сельскохозяйственных культур, как высота, биомасса и созревание [6]. Использование PGPR [7], в том числе бактерий *Pseudomonas* [3, 8, 9], существенно уменьшало фитотоксичность Ni и повышало устойчивость растений к токсическому действию этого тяжелого металла. Инокуляция ростстимулирующими бактериями рода *Pseudomonas* способствовала значительному уменьшению поступления свинца и кадмия из загрязненной агросерой почвы в вегетативную массу ячменя на ранних стадиях онтогенеза, повышая устойчивость растений к токсическому действию тяжелых металлов [10, 11]. Стимулирование роста сельскохозяйственных культур при использовании бактерий рода *Pseudomonas* происходило, в том числе, вследствие улучшения минерального питания культур [12, 13]. Влияние ростстимулирующих ризосферных бактерий на минеральное питание растений при загрязнении почвы тяжелыми металлами, том числе Ni, изучено недостаточно.

Цель исследований – определение влияния ростстимулирующей ризосферной бактерии *P. fluorescens* 20 на рост яровой пшеницы и элементный химический состав растений, включая содержание в них Ni, при загрязнении почвы тяжелым металлом.

**Методика.** Работу проводили в 2021 г. при выращивании яровой пшеницы (*T. aestivum* L.), сорта Злата (Московский НИИСХ «Немчиновка») в вегетационном опыте в оранжерее при искусственном загрязнении почвы водорастворимым соединением Ni. В сосудах диаметром 10 см и высотой 11 см, наполненных 800 г почвы, выращивали по 10 растений до фазы выхода в трубку в течение 26 дней. Изучали влияние 20-го штамма бактерии *P. fluorescens* на рост и элементный химический состав растений, в том числе содержание в них Ni. Схема опыта предусматривала следующие варианты: без загрязнения почвы Ni и инокуляции бактерией (контроль); загрязнение почвы Ni без инокуляции бактерией; загрязнение почвы Ni с инокуляцией бактерией. Использовали пахотную, среднесуглинистую агросерую почву (Luvisol) из слоя 0...20 см, на которой в предшествующий год выращивали ячмень. Химически чистую соль NiCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O вносили за 10 дней до посева семян из расчета 300 мг Ni/кг в виде раствора, равномерно перемешивая его со всем объемом почвы в сосуде. Такая доза Ni превышает предельно допустимую концентрацию тяжелого металла в почве в валовой форме более, чем в 3,5 раза, в подвижной форме, содержание которой в исходной почве находилось на «следовом» уровне, – в 75 раз. Минеральные удобрения вносили из расчета по 100 мг действующего вещества азота, фосфора и калия на 1 кг почвы соответственно в виде азотнокислого аммония, двухзамещенного фосфорнокислого калия и сернокислого калия. При посеве пророщенные семена инокулировали водной суспензией бактерий из расчета 10<sup>8</sup> клеток на растение. В варианте без инокуляции семена обрабатывали аналогичным образом адекватным количеством автоклавированной бактериальной суспензии. Влажность почвы в сосудах в течение вегетационного периода поддерживали поливами на уровне не ниже 60 % ПВ. Повторность опыта пятикратная.

После окончания выращивания (в фазе выхода в трубку) вегетативную массу (листья и стебли) и корни

растений высушивали при 70 °C и взвешивали. Корни отмывали от почвы водопроводной, а затем дистиллированной водой. Растительный материал (0,5 г) после сжигания в смеси концентрированных кислот HNO<sub>3</sub> : HClO<sub>4</sub> (2 : 1) анализировали на содержание Ni и других зольных элементов. Содержание валового азота определяли феноловым методом после сжигания растительного материала (0,1 г) в разбавленной серной кислоте (1 : 2) с катализатором (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : Zn : Se : CuSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O = 100 : 24 : 2 : 0,2). Концентрацию Ni и других зольных элементов (кроме калия) в растворах определяли методом эмиссионно-оптической спектроскопии индуктивно-связанной плазмы на спектрометре ICP OES Optima 5300 DV (США). Калий определяли методом пламенной фотометрии на пламенном фотометре BWB XP (Великобритания). Статистическую обработку данных проводили с использованием функций MS Excel 2010. Нормальность распределений определяли по критерию Пирсона. Для оценки погрешности вычисляли стандартные отклонения от среднего, а для оценки достоверности различий концентрации элементов в пробах использовали t-тест Стьюдента.

**Результаты и обсуждение.** При загрязнении почвы Ni происходило значительное ингибирование роста яровой пшеницы (табл. 1). Это выразилось в формировании вдвое меньшей массы вегетативных органов и целых растений к фазе выхода в трубку, относительно контроля – варианта без загрязнения тяжелым металлом и бактериальной инокуляции. Масса корней в условиях Ni стресса так же уменьшилась более чем вдвое. Использование бактерии *P. fluorescens* 20 значительно снижало токсическое действие тяжелого металла на растения. При внесении бактерии вегетативная масса растений, подвергнутых Ni стрессу, была в 1,5 раза больше, чем в варианте с загрязнением почвы без инокуляции. Одновременно улучшался рост корневой системы. Масса корней растений в почве, загрязненной тяжелым металлом, при инокуляции *P. fluorescens* 20 увеличилась на 70 %. Вегетативная масса при использовании бактерии достигала 82 % от уровня контроля, масса корней – 68 %.

Инокуляция *P. fluorescens* 20 не оказала существенного влияния на содержание Ni в вегетативной массе и корнях (см. табл. 1). При этом в корнях его концентрация была в десятки раз больше, чем в надземной части растений. Внесение бактерии увеличивало вынос Ni (в мкг/сосуд) вегетативной массой растений и корнями из загрязненной тяжелым металлом почвы в 1,7...1,8

**Табл. 1. Масса растений и содержание Ni в растениях при загрязнении почвы и внесении бактерии**

Вариант	Масса растений (сухое вещество)			Содержание Ni	
	вегетативная масса	корни	целое растение	вегетативная масса, мг/кг	корни, %
Без Ni и инокуляции бактерией (контроль)	2,44	1,08	3,52	8a*	0,02 <sup>a</sup>
Ni без инокуляции бактерией	1,20	0,43	1,63	254 <sup>b</sup>	1,21 <sup>b</sup>
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	2,00	0,73	2,73	265 <sup>b</sup>	1,27 <sup>b</sup>
НСР <sub>05</sub>	0,37	0,12	0,60		

\*величины, обозначенные разными буквами, отличаются между собой при уровне значимости 5 %.

**Табл. 2. Вынос Ni растениями при загрязнении почвы и внесении бактерии**

Вариант	Вегетативная масса, мкг/сосуд	Корни, мкг/сосуд	Целое растение	
			мкг/сосуд	% от внесенной дозы
Без Ni и инокуляции бактерией (контроль)	20	216	236	–
Ni без инокуляции бактерией	305	5203	5508	1,9
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	530	9271	9801	3,3
HCP <sub>05</sub>	60	1711	1805	

раза (табл. 2). Доля Ni в суммарной массе растений по вариантам опыта составляла 1,9...3,3 % от внесенного количества, увеличиваясь при инокуляции бактерией.

Инокуляция бактерией на фоне загрязнения почвы Ni не оказала значительного влияния на содержание всех изученных макро- и микроэлементов в вегетативных органах и корнях растений, по сравнению с вариантом без бактерии в загрязненных условиях (табл. 3). Относительно контрольного варианта, при загрязнении почвы Ni содержание Mg в вегетативной массе возросло в 3,2...3,3 раза, Zn – в 2,1, Cu – в 1,8...1,9, P – в 1,5, Mn – в 1,3...1,4 раза, количество Ca в вегетативной массе в загрязненных условиях уменьшилось в 2,4...2,5 раза.

В корнях, как и в вегетативных органах растений, на загрязненной Ni почве, установлено значительное (в 2,1 раза) увеличение содержания Mg, по сравнению с контролем. При этом, в отличие от надземной части растений, в том числе с внесением бактерий, обнаружено повышение концентрации Ca более чем втрое. Кроме того, в корнях при загрязнении Ni более значительно (в 1,7...1,8 раза), чем в вегетативных органах, увеличивалось содержание Fe, а P, Zn и Cu – изменялось менее существенно, Mn – возрастала примерно в такой же степени, как и в вегетативных органах. Под влиянием загрязнения Ni концентрация K, как в корнях, так и в вегетативной массе по всем вариантам опыта изменялась незначительно. При загрязнении Ni независимо от бактериальной инокуляции установлено

лишь некоторое изменение содержания азота в надземной части растений, при незначительном уменьшении величины этого показателя в корнях после инокуляции, относительно контрольного варианта.

Использование *P. fluorescens* 20 в условиях Ni стресса увеличивало вынос всех изученных питательных элементов из почвы, относительно варианта без инокуляции, вегетативными органами растений в 1,7...2,0 раза, корнями – в 1,3...2,2 раза (табл. 4). Загрязнение почвы Ni без инокуляцией бактериями, напротив, значительно уменьшило вынос вегетативной массой растений, по сравнению с контролем, большинства элементов, за исключением Mg, Zn и Cu. При этом количество Mg в растениях увеличилось примерно в 1,5 раза, а Zn и Cu – не изменилось. С корнями уменьшился вынос всех элементов (за исключением Ca).

Использование бактерии *P. fluorescens* 20 при внесении водорастворимого соединения Ni в агросерую почву значительно уменьшило токсическое действие тяжелого металла на растения яровой пшеницы в фазе трубкования. При этом установлена стимуляция их роста и увеличение массы вегетативных органов и корней в загрязненных условиях.

Известно, что инокуляты, состоящие из бактерий рода *Pseudomonas*, обеспечивали увеличение массы растений нута в вегетационном опыте при концентрации 2 mM Ni [14] и значительно повышали массу горчицы сарептской (*Brassica juncea*) при выращивании на загрязненной Ni почве [15]. Ранее в результате проведения вегетационных опытов было установлено, что при загрязнении агросерой почвы соединениями Pb и Cd внесение ростстимулирующих бактерий рода *Pseudomonas* полностью устраняло токсическое действие тяжелых металлов на растения ячменя [10, 11]. При этом их масса была такой же, как и у выращенных без загрязнения почвы тяжелыми металлами [10, 11]. В нашем опыте инокуляция бактериями при загрязнении агросерой почвы Ni, несмотря на значительное уменьшение негативного действия тяжелого металла на растения яровой пшеницы не устраняла его полностью. Вероятно, это было связано с использованием высокой дозы Ni, а также с большей чувствительностью к тяжелым металлам яровой пшеницы, по сравнению с ячменем, который, как известно, относится к числу видов устойчивых к токсическому действию Cd [16]

**Табл. 3. Содержание питательных элементов в растениях при загрязнении почвы Ni и внесении бактерии**

Вариант	N	P	K	Ca	Mg	Fe*	Mn	Zn	Cu	
	%				мкг/кг					
Вегетативная масса										
Без Ni и инокуляции бактерией (контроль)	3,9***	0,4 <sup>a</sup>	0,4 <sup>a</sup>	0,5 <sup>a</sup>	215 <sup>a</sup>	159 <sup>a</sup>	42 <sup>a</sup>	22 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	
Ni без инокуляции бактерией	4,1 <sup>a</sup>	0,6 <sup>b</sup>	0,4 <sup>a</sup>	0,2 <sup>b</sup>	685 <sup>b</sup>	180 <sup>b</sup>	54 <sup>b</sup>	45 <sup>b</sup>	22 <sup>b</sup>	
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	4,1 <sup>a</sup>	0,6 <sup>b</sup>	0,4 <sup>a</sup>	0,2 <sup>b</sup>	710 <sup>b</sup>	179 <sup>b</sup>	57 <sup>b</sup>	45 <sup>b</sup>	23 <sup>b</sup>	
Корни										
Без Ni и инокуляции бактерией (контроль)	3,1 <sup>a</sup>	0,7 <sup>a</sup>	2,1 <sup>a</sup>	0,5 <sup>a</sup>	663 <sup>a</sup>	0,2 <sup>a</sup>	277 <sup>a</sup>	89 <sup>a</sup>	144 <sup>a</sup>	
Ni без инокуляции бактерией	3,1 <sup>a</sup>	0,7 <sup>a</sup>	2,1 <sup>a</sup>	1,7 <sup>b</sup>	1380 <sup>b</sup>	0,4 <sup>b</sup>	333 <sup>b</sup>	103 <sup>b</sup>	144 <sup>a</sup>	
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	2,6 <sup>a</sup>	0,6 <sup>a</sup>	2,0 <sup>a</sup>	1,7 <sup>b</sup>	1380 <sup>b</sup>	0,4 <sup>b</sup>	420 <sup>b</sup>	99 <sup>b</sup>	162 <sup>b</sup>	

\*содержание Fe в корнях дано в %;

\*\*величины, обозначенные разными буквами, различаются между собой при уровне значимости 5 %.

Табл. 4. Вынос питательных элементов растениями при загрязнении почвы Ni и внесении бактерии

Вариант	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
	мг/сосуд				мкг/сосуд				
Вегетативная масса									
Без Ni и инокуляции бактерией (контроль)	95	10	10	12	525	388	103	54	29
Ni без инокуляции бактерией	49	7	4	2	822	216	65	54	26
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	82	12	8	4	1420	358	114	90	46
HCP <sub>05</sub>	8	2	2	1	132	66	32	11	3
Корни									
Без Ni и инокуляции бактерией (контроль)	34	6	23	6	716	2497	299	96	155
Ni без инокуляции бактерией	13	3	12	7	593	1690	143	44	62
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	19	4	15	12	1007	3635	268	72	118
HCP <sub>05</sub>	5	1	3	1	103	624	90	10	36

Положительное влияние испытанной бактерии на рост растений в условиях загрязнения почвы Ni и повышение их устойчивости к токсическому действию тяжелого металла при внесении бактерии, можно объяснить увеличением накопления питательных элементов в вегетативной массе и корнях инокулированных растений и, следовательно, улучшением их минерального питания. Микробы, ассоциированные с растениями, могут стимулировать их рост, оказывая положительное влияние на минеральное питание растений, в том числе в присутствии тяжелых металлов [4, 10, 11]. Вынос питательных элементов и Ni вегетативными органами и корневой системой из загрязненной почвы после инокуляции увеличился вследствие повышения их массы, то есть в результате стимуляции ростовых процессов, в целом без существенных изменений содержания элементов в вегетативных органах и корневой системе. Результаты наших исследований свидетельствуют, что под влиянием бактерий в условиях Ni стресса происходило увеличение выноса растениями из загрязненной почвы питательных элементов, в том числе Mg, который входит в состав хлорофилла и непосредственно участвует в процессе фотосинтеза. Это, вероятно, служит ответной протекторной реакцией инокулированных растений на присутствие Ni. Без использования бактерий загрязнение почвы Ni ингибировало рост растений и уменьшало их массу. При этом установлено увеличение содержания Mg и ряда других элементов в вегетативной массе и корнях инокулированных растений.

Внесение бактерии *Pseudomonas* sp. в загрязненную Ni почву увеличивало биомассу горчицы сарептской и не оказывало влияния на содержание тяжелого металла в растениях [15]. Инокуляция индийской горчицы (*Indian mustard*) бактерией *Pseudomonas* Ps29C, устойчивой к Ni, защищала растения от тяжелого металла, внесенного в различных концентрациях в почву, не воздействуя при этом на аккумуляцию Ni в побегах и корнях [17]. В наших исследованиях прибавки массы растений были отмечены при использовании бактерии *P. fluorescens* 20 в загрязненных условиях, без существенных изменений концентрации Ni в вегетативных

органах и корневой системе. При этом вынос Ni возрастал вследствие увеличения их массы. Одновременно усиливался процесс фитоэкстракции, способствуя тем самым очистке почвы от тяжелого металла.

Таким образом, внесение ростстимулирующей ризосферной бактерии *P. fluorescens* 20 в искусственно загрязненную Ni агросерую почву значительно уменьшало фитотоксичность тяжелого металла, стимулировало рост и увеличивало массу вегетативных органов и корневой системы яровой пшеницы в фазе трубкования, что, вероятно, было обусловлено ответной протекторной реакцией инокулированных растений на загрязнение почвы Ni. Инокуляция бактериями не устраняла полностью токсическое действие на растения тяжелого металла, внесенного в дозе 300 мг/кг почвы. Повышение устойчивости яровой пшеницы к токсическому действию Ni при бактериальной инокуляции было обусловлено улучшением минерального питания и сопровождалось увеличением выноса вегетативной массой и корневой системой макро- и микроэлементов. При этом существенных изменений содержания питательных элементов в вегетативной массе и корнях в целом не происходило. Использование бактерии увеличило вынос Ni из загрязненной почвы вегетативными органами и корнями растений, что усилило процесс фитоэкстракции. Это также происходило из-за увеличения их массы без существенного изменения содержания тяжелого металла. Загрязнение почвы Ni независимо от бактериальной инокуляции увеличивало концентрацию Mg в вегетативной массе и корневой системе растений.

#### Литература

1. Нейтрализация загрязненных почв / под ред. Мажайского Ю.А. Рязань: Мецкерский ф-л ВНИИГиМ РАСХН, 2008. 528 с.
2. Phytoremediation of heavy metals contaminated soil using plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A current perspective / A. Handsa, V. Kumar, A. Anshumali, et al. // Recent Research in Science Technology. 2014. Vol. 6. No. 1. P. 131–134.
3. Ризосферные бактерии рода *Pseudomonas* в современных агроботехнологиях / Т.О. Анохина, Т.В.

- Сиунова, О.И. Сизова и др. // *Агрехимия*. 2018. № 10. С. 54–66.
4. *Beneficial Microbes for Sustainable Agriculture* / A.K. Chandel, H. Chen, H. Ch. Sharma, et al. // *Microbes for Sustainable Development and Bioremediation. Chapter 15* / Eds Chandra R., Sobti R.C. Boca Raton: CRC Press, 2020. 386 p.
  5. Dorjey S., Dolkar D., Sharma R. Plant growth promoting rhizobacteria *Pseudomonas*: A review // *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2017. Vol. 6. No. 7. P. 1335–1344.
  6. Developing novel bacterial based bioformulation having PGPR properties for enhanced production of agricultural crops / M. Kalita, M. Bharadwaz, T. Dey, et al. // *Indian Journal of Experimental Biology*. 2015. Vol. 53. No. 1. P. 56–60.
  7. Burd G.I., Dixon D.G., Glick B.R. A plant growth-promoting bacterium that decreases nickel toxicity in seedlings // *Applied and Environmental Microbiology*. 1998. Vol. 64. No. 10. P. 3663–3668.
  8. The use of transgenic canola (*Brassica napus*) and plant growth-promoting bacteria to enhance plant biomass at a nickel-contaminated field site / A.J. Farwell, S. Vesely, V. Nero, et al. // *Plant and Soil*. 2006. Vol. 288. No. 1–2. P. 309–318.
  9. Tolerance of transgenic canola plants (*Brassica napus*) amended with plant growth-promoting bacteria to flooding stress at a metal-contaminated field site / A.J. Farwell, S. Vesely, V. Nero, et al. // *Environmental Pollution*. 2007. Vol. 147. No. 3. P. 540–545.
  10. Шабает В.П. Почвенно-агрехимические аспекты ремедиации загрязненной свинцом почвы при внесении стимулирующих рост растений ризосферных бактерий // *Почвоведение*. 2012. № 5. С. 601–611.
  11. Шабает 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.
  12. Шабает В.П. Минеральное питание растений при инокуляции ростстимулирующими ризосферными бактериями рода *Pseudomonas* // *Успехи современной биологии*. 2012. Т. 132. № 3. С. 268–281.
  13. *Plant-microbe interactions in agro-ecological perspectives. Volume 1: Fundamental mechanisms, methods and functions* // Eds. Singh D.R., Singh H.B., Prabha R. Springer, 2017. Chapter 10.4. Beneficial role of rhizosphere microbes on plants. P. 185–189.
  14. Tank N., Saraf M. Enhancement of plant growth and decontamination of nickel-spiked soil using PGPR // *Journal of Basic Microbiology*. 2009. Vol. 49. No. 2. P. 195–204.
  15. Inoculation of endophytic bacteria on host and non-host plants-effects on plant growth and Ni uptake / Y. Ma, M. Rajkumar, Y. Luo, et al. // *Journal Hazard Mater*. 2011. Vol. 195. P. 230–237.
  16. Казнина Н.М., Тутов А.Ф. Влияние кадмия на физиологические процессы и продуктивность растений семейства *Poaceae* // *Успехи современной биологии*. 2013. Т. 133. № 6. С. 588–603.
  17. Rajkumar M., Freitas H. Effects of inoculation of plant-growth promoting bacteria on Ni uptake by Indian mustard // *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99. No. 9. P. 3491–3498.

Поступила в редакцию 03.06.2021

После доработки 22.07.2021

Принята к публикации 13.08.2021