

УДК 546.74: 581.192: 631.484

## ВЛИЯНИЕ РОСТСТИМУЛИРУЮЩИХ РИЗОСФЕРНЫХ БАКТЕРИЙ НА УРОЖАЙ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ НИКЕЛЕМ АГРОСЕРОЙ ПОЧВЫ<sup>§</sup>

© 2022 г. В. П. Шабает<sup>1,\*</sup>, В. Е. Остроумов<sup>1</sup>, М. П. Волокитин<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН  
142290 Пушкино Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия<sup>2</sup>Институт фундаментальных проблем биологии РАН  
142290 Пушкино Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

\*E-mail: vpsh@rambler.ru

Поступила в редакцию 03.03.2022 г.

После доработки 06.04.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

В вегетационном опыте исследовано влияние ростстимулирующих ризосферных бактерий рода *Pseudomonas* на урожай яровой пшеницы при выращивании растений до полной спелости на искусственно загрязненной никелем агросерой почве. Установлена устойчивость растений к токсическому действию тяжелого металла при внесении бактерий. Определены элементный химический состав, вынос никеля и биофильных элементов надземной биомассой, включая зерно, и корневой системой растений.

**Ключевые слова:** *Pseudomonas*, *Triticum aestivum* L., NiCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O, химический состав растений.

**DOI:** 10.31857/S0002188122100106

### ВВЕДЕНИЕ

При повышенном содержании никеля (Ni) в почве происходит угнетение роста и развития растений [1]. Установлено, что применение стимулирующих рост растений ризосферных бактерий [2], в том числе бактерий рода *Pseudomonas* [3–6], существенно уменьшало фитотоксичность Ni и повышало устойчивость растений к токсическому действию тяжелого металла (ТМ). В предыдущем вегетационном опыте было изучено влияние внесения ростстимулирующих ризосферных бактерий рода *Pseudomonas* на рост и элементный химический состав культуры яровой пшеницы при выращивании растений до фазы выхода в трубку на искусственно загрязненной Ni агросерой почве [7]. Применение бактерий *P. fluorescens* 20, *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23 уменьшало фитотоксичность ТМ, стимулировало рост и увеличило массу вегетативных органов и корневой системы яровой пшеницы, усилило фитоэкстракцию Ni и улучшило минеральное питание растений в загрязненных условиях. Исследований по влиянию ростстимулирующих ризосферных бактерий

рода *Pseudomonas* на урожай, в особенности зерна, и минеральное питание зерновых культур при их выращивании до полной спелости в условиях загрязнения почвы Ni проведено недостаточно.

Цель работы – изучение влияния внесения ростстимулирующих ризосферных бактерий рода *Pseudomonas* на урожай яровой пшеницы и элементный химический состав растений, включая содержание и накопление в них Ni, при выращивании растений до созревания на агросерой почве, загрязненной ТМ.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили при выращивании культуры яровой пшеницы *T. aestivum* L. сорта Злата (Московский НИИСХ “Немчиновка”) на агросерой почве юга Московской обл. в вегетационном опыте при искусственном загрязнении почвы водорастворимым соединением Ni. В сосудах, содержащих 5 кг почвы, выращивали по 13 растений до полного созревания в течение 118 сут. В работе испытывали 20-й штамм бактерии *P. fluorescens*, 21-й штамм бактерии *P. fluorescens* и 23-й штамм бактерии *P. putida*, увеличивавших устойчивость растений к токсическому

<sup>§</sup> В работе использованы материалы исследований по теме госзаданий №№ 121041500050-3, 121040800142-5 и 121040800103-6.

действию ТМ при выращивании до фазы выхода в трубку [7]. В контрольном варианте растения культивировали без внесения Ni и бактерий, во втором – с внесением Ni без бактерий, в остальных трех вариантах на фоне загрязнения почвы Ni – с внесением каждой из вышеупомянутых бактерий. В опыте был использован пахотный горизонт среднесуглинистой агросерой почвы (Luvisol) (слой 0–20 см), на которой в предшествующий год выращивали ячмень. Почва имела следующие показатели:  $pH_{KCl}$  5.62,  $C_{орг}$  – 1.3%,  $N_{вал}$  – 142 мг/100 г почвы, Ca и Mg (1 н. KCl) – 12.7 и 1.7 ммоль-экв/100 г, N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub> (0.1 н. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) – 0.5 и 0.6 мг/100 г соответственно, подвижные P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и K<sub>2</sub>O (0.2 н. HCl) – 20.2 и 12.9 мг/100 г почвы соответственно.

В почву вносили NiCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O (квалификации “х.ч.” (Реахим, Россия)) из расчета 200 мг Ni/кг почвы за 10 сут до посева семян на фоне внесения NPK-удобрений по 100 мг д.в./кг почвы в виде азотнокислого аммония, двухзамещенного фосфорнокислого калия и сернокислого калия. При посеве стерилизованные, пророщенные семена раскладывали на почве и инокулировали водными суспензиями чистых культур бактерий в водопроводной воде из расчета 10<sup>8</sup> кл./растение и засыпали 3-см слоем почвы. В вариантах без инокуляции бактериями вносили аналогичным образом адекватное количество автоклавированных бактериальных суспензий. Влажность почвы в сосудах в течение вегетационного периода поддерживали поливами на уровне ≥60% ПВ. Повторность опыта четырехкратная.

После срезания растения высушивали при 70°C до постоянной массы и взвешивали отдельно зерно, солому (листья, стебли и половину) и корни. Корни отмывали от почвы водопроводной, а затем дистиллированной водой. 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>·5H<sub>2</sub>O = 100 : 24 : 2 : 0.2) определяли содержание азота в растениях феноловым методом. 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 Ni и зольных элементов (кроме калия) в растворах определяли методом эмиссионно-оптической спектроскопии индуктивно-связанной плазмы на спектрометре ICP OES Optima 5300 DV (Perkin Elmer, США). Калий определяли методом пламенной фотометрии на пламенном фотометре BWB XP (BWB, Великобритания), pH – на pH-метре pH 325-B (WTW, Германия). Статистическую обра-

ботку полученных данных проводили с использованием пакета MS Excel 2010.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При загрязнении почвы Ni без внесения бактерий установлено токсическое действие ТМ на растения яровой пшеницы, которое выражалось в уменьшении надземной массы растений: зерна – на 14, соломы – на 20% по сравнению с контролем – вариантом без загрязнения почвы металлом и инокуляции бактериями (табл. 1). Масса корней в условиях Ni-стресса уменьшилась в 1.7 раза. Внесение всех бактерий в загрязненных условиях оказывало примерно одинаковое действие и увеличило массу зерна на 19–22, соломы – на 19–32%. Бактерии при загрязнении Ni также способствовали лучшему росту корневой системы. Масса корней, загрязненных металлом растений, при инокуляции бактериями увеличилась в 1.5–1.8 раза. На фоне достоверного уменьшения урожая неинокулированных растений под влиянием Ni по сравнению с контролем, применение всех бактерий в загрязненных условиях обеспечивало получение такого же урожая, в том числе и зерна, как и не инокулированных растений без загрязнения. Масса корней и соломы растений, инокулированных бактериями, были практически такими же, как и в контрольном варианте. Таким образом, применение этих бактерий полностью устраняло токсическое действие Ni, внесенного из расчета 200 мг/кг почвы, на растения яровой пшеницы. В результате проведения предыдущего вегетационного опыта было также обнаружено, что применение данных бактерий значительно уменьшало токсическое действие Ni на растения и стимулировало их рост при выращивании до фазы трубкования и загрязнении металлом в дозе 300 мг/кг почвы [7].

Применение бактерий не оказало существенного влияния на содержание Ni в зерне и соломе (табл. 2). Содержание Ni в корневой системе инокулированных бактериями растений, напротив, увеличилось в 1.2–1.4 раза. При этом в корнях содержалось в десятки раз больше Ni, чем в надземных органах. Применение бактерий увеличило вынос Ni (в мкг/сосуд) зерном из загрязненной ТМ почвы в 1.3–1.4 раза, соломой – в 1.4–1.6 раза (табл. 3). Накопление Ni корнями было значительно больше по сравнению с зерном и соломой и увеличилось при внесении бактерий в 1.7–2.5 раза. Под влиянием внесения бактерии *P. putida* 23 в наибольшей степени увеличились содержание в корнях и вынос Ni корнями и суммарной биомассой растений.

**Таблица 1.** Биомасса растений в период уборки

Вариант	Масса растений (сухое вещество), г/сосуд			
	зерно	солома	корни	сумма
Без Ni и внесения бактерий – контроль	23.4	30.4	3.6	57.4
Ni без внесения бактерий	20.0	24.4	2.1	46.5
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	24.4	32.2	3.1	59.7
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	24.2	29.0	3.3	56.5
Ni + <i>P. putida</i> 23	23.8	29.3	3.7	56.8
HCP <sub>05</sub>	3.3	4.9	1.1	9.8

В вариантах с инокуляцией бактериями после срезания загрязненных Ni растений в фазе полного созревания не установлено существенных изменений реакции почвенной среды по сравнению с вариантом с загрязнением почвы без применения бактерий (табл. 4). Некоторое увеличение рН<sub>KCl</sub> (на 0.34–0.43 ед.) относительно исходной почвы было отмечено только при загрязнении никелем как без внесения, так и при внесении бактерий.

В табл. 5 представлены данные содержания макро- и микроэлементов в различных органах растений. При загрязнении почвы Ni без внесения бактерий установлено увеличение содержания практически всех исследованных биофильных элементов в зерне, соломе и корнях по сравнению с контролем. При этом исключения касались фосфора, Ca и Mg, для которых величины этого показателя в различных органах или не изменялись или увеличивались, или уменьшались, а также Cu, содержание которой в растениях было на минимальном уровне по сравнению с другими элементами. Увеличение содержания элементов в органах растений при загрязнении Ni без внесения бактерий, вероятно, происходило вследствие концентрирования элементов в результате уменьшения массы загрязненных ТМ растений и угнетения их роста (табл. 1). Под влиянием внесения всех бактерий на фоне загрязнения Ni содержание большинства элементов в зерне не изменялось по сравнению с не инокулированным вариантом с загрязнением, кроме некоторого увеличения этого показателя для фосфора, Mn, а также Mg за исключением вариантов с инокуляцией *P. fluorescens* 20 и *P. putida* 23. При применении всех бактерий в загрязненных условиях в соломе содержалось больше Fe, несколько больше Mg, Mn и Zn (кроме варианта с *P. fluorescens* 21), в корнях – содержание практически всех элементов существенно не изменялось.

В табл. 6 представлены данные выноса из почвы макро- и микроэлементов зерном и суммар-

ной биомассой растений. Без применения бактерий при загрязнении Ni вынос почти всех элементов зерном изменялся в виде тенденции, кроме значительного уменьшения этого показателя для Ca и Mg и увеличения – для Mn. В суммарной биомассе загрязненных Ni растений количество большинства элементов без инокуляции бактериями также изменялось в виде тенденции, кроме достоверного уменьшения этого показателя для Ca. Внесение бактерий в целом примерно в одинаковой степени влияло на вынос биофильных элементов растениями из загрязненной почвы. Под влиянием применения всех бактерий увеличилось накопление большинства элементов в зерне, кроме некоторого уменьшения этого показателя для Ca и при этом не изменился вынос Fe и Cu, кроме его увеличения при инокуляции *P. fluorescens* 20. Применение бактерий на фоне загрязнения Ni увеличило вынос суммарной биомассой растений всех исследованных элементов из почвы. При этом наибольшее увеличение (в 1.5–1.7 раза) было установлено для Fe и Mn. Увеличение выноса питательных элементов инокулированными бактериями растениями из загрязненной почвы происходило в основном вследствие стимуляции их роста (табл. 1).

**Таблица 2.** Содержание Ni в растениях в период уборки

Вариант	Зерно	Солома	Корни
	Ni, мг/кг		
Без Ni и внесения бактерий – контроль	2	2	5
Ni без внесения бактерий	12	6	142
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	14	7	166
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	13	7	171
Ni + <i>P. putida</i> 23	13	7	199
HCP <sub>05</sub>	2	1	19

Таблица 3. Вынос Ni растениями

Вариант	Зерно	Солома	Корни	Сумма
	вынос Ni, мкг/сосуд			
Без Ni и внесения бактерий – контроль	47	61	18	126
Ni без внесения бактерий	240	146	298	684
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	342	225	515	1082
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	315	203	564	1082
Ni + <i>P. putida</i> 23	309	205	736	1250
HCP <sub>05</sub>	63	45	100	185

Таблица 4. Реакция почвенной среды после выращивания растений

Вариант	pH <sub>KCl</sub> почвенной суспензии, ед.
Без Ni и внесения бактерий – контроль	6.20 ± 0.01
Ni без внесения бактерий	6.26 ± 0.04
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	6.25 ± 0.04
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	6.26 ± 0.04
Ni + <i>P. putida</i> 23	6.29 ± 0.03
Исходная почва	5.86 ± 0.00

Примечание. Средние из 4-х повторностей опыта ± ошибки средней.

Таким образом, проведенное исследование показало, что применение стимулирующих рост растений бактерий *P. fluorescens* 20, *P. fluorescens* 21 или *P. putida* 23 оказало положительное влияние на рост яровой пшеницы при загрязнении агросерой почвы водорастворимым соединением Ni в дозе 200 мг/кг почвы. При этом внесение бактерий увеличило урожай, в том числе и зерна, в условиях искусственного загрязнения почвы ТМ. Исследованные бактерии в одинаковой степени стимулировали рост загрязненных растений. Кроме того, все бактерии полностью устраняли негативное влияние Ni на растения яровой пшеницы, обеспечивая получение такой же биомассы растений, включая зерно, как и не инокулированных растений, не подвергнутых Ni-стрессу. Таким образом, внесение бактерий повышало устойчивость растений яровой пшеницы к негативному действию ТМ. Ранее в результате проведения вегетационных опытов было установлено, что при загрязнении агросерой почвы соединениями Pb и Cd соответственно из расчета 200 мг Pb и 10 мг Cd/кг почвы внесение ростстимулирующих бактерий рода *Pseudomonas* также полностью

устраняло токсическое действие ТМ на растения ячменя [8, 9]. При этом применение бактерий обеспечивало получение такой же биомассы растений, как и выращенных без загрязнения.

Испытанные бактерии, оказали неоднозначное влияние на биомассу яровой пшеницы, содержание и аккумуляцию Ni в растениях. Инокуляция индийской горчицы бактерией *Pseudomonas* Ps29C, устойчивой к Ni и стимулирующей рост растений, защищала их от металла, внесенного в различных концентрациях в почву, не влияя при этом на аккумуляцию Ni в корнях и побегах [10]. Применение в загрязненной Ni почве ростстимулирующих бактерий *Pseudomonas* sp. увеличило биомассу горчицы сарептской (*Brassica juncea*), не оказывая влияния на содержание ТМ в растениях [11]. В наших исследованиях прибавки биомассы растений в загрязненных условиях при применении всех бактерий происходили также без существенных изменений содержания Ni в зерне и соломе. Внесение испытанных бактерий увеличило вынос растениями Ni зерном и соломой из загрязненной почвы, как и при выращивании растений до фазы трубкования в предыдущем опыте [7] и, таким образом, усилило фитоэкстракцию ТМ вследствие стимуляции роста растений, без существенных изменений содержания в них ТМ. В корневой системе при полной спелости растений содержалось значительно больше Ni, чем в надземных органах, как и в вегетативной массе в предыдущем опыте в фазе трубкования [7]. Под влиянием бактерий увеличились как содержание, так и накопление Ni в корневой системе, причем в наибольшей степени при инокуляции *P. putida* 23. Увеличение содержания в корнях инокулированных бактериями растений, наряду с увеличением накопления в них Ni, свидетельствовало об усилении барьера на границе надземные органы–корни при поступлении ТМ в зерно и солому. Усиление этого барьера уменьшило проникновение Ni в надземные органы и, таким образом, повышало устойчивость растений к токсическому действию ТМ, устраняя его негативное действие.

Увеличение аккумуляции Ni в растениях под влиянием бактерий происходило без существенных изменений реакции почвенной среды, которая, как известно, оказывает существенное влияние на подвижность в почве и биодоступность ТМ. Увеличение выноса Ni надземной биомассой и в корневой системе инокулированных бактериями рода *Pseudomonas* растений было, вероятно, обусловлено увеличением подвижности в почве ТМ под влиянием продуцируемых бактериями экзометаболитов – сидорофоров. Бактериальные

**Таблица 5.** Содержание биофильных элементов в растениях

Вариант	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
	%					мг/кг			
	Зерно								
Без Ni и внесения бактерий – контроль	1.88	0.18	0.23	0.08	0.24	124	13	60	4
Ni без внесения бактерий	2.06	0.20	0.30	0.07	0.24	159	18	74	5
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	2.02	0.24	0.30	0.05	0.25	164	21	74	5
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	2.14	0.26	0.30	0.05	0.28	136	24	72	4
Ni + <i>P. putida</i> 23	2.04	0.23	0.34	0.05	0.29	133	25	70	4
	Солома								
Без Ni и внесения бактерий – контроль	0.36	0.07	2.12	0.94	0.28	161	21	34	6
Ni без внесения бактерий	0.40	0.07	2.20	0.83	0.32	206	27	37	7
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	0.32	0.07	2.24	0.77	0.34	247	32	42	7
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	0.36	0.06	2.26	0.77	0.37	371	41	37	8
Ni + <i>P. putida</i> 23	0.31	0.07	2.20	0.78	0.37	371	38	43	7
	Корни								
Без Ni и внесения бактерий – контроль	1.14	0.02	0.33	1.25	0.32	1.20	140	98	9
Ni без внесения бактерий	1.33	0.04	0.43	0.58	0.40	1.33	170	107	9
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	1.20	0.05	0.38	0.45	0.48	1.35	177	98	10
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	1.20	0.05	0.37	0.53	0.42	1.41	171	115	11
Ni + <i>P. putida</i> 23	1.20	0.06	0.39	0.56	0.42	1.36	162	125	11

Примечания. 1. Содержание Fe в корнях дано в %. 2. Средние из 4-х повторностей опыта. 3. Ошибки определений макро- и микроэлементов в вариантах опыта не превышали соответственно 5 и 15%.

**Таблица 6.** Вынос биофильных элементов растениями

Вариант	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
	мг/сосуд					мкг/сосуд			
	Зерно								
Без Ni и внесения бактерий – контроль	440	42	54	19	56	2900	304	1400	94
Ni без внесения бактерий	412	40	60	14	48	3180	360	1480	100
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	492	59	73	12	61	4000	512	1810	122
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	518	63	73	12	68	3290	581	1740	97
Ni + <i>P. putida</i> 23	486	55	81	12	69	3170	595	1670	95
HCP <sub>05</sub>	70	11	11	2	10	830	110	180	25
	Целое растение								
Без Ni и внесения бактерий – контроль	590	64	711	350	153	7850	1450	2790	308
Ni без внесения бактерий	538	58	606	229	134	8230	1380	2610	290
Ni + <i>P. fluorescens</i> 20	632	83	806	274	186	12000	2090	3460	378
Ni + <i>P. fluorescens</i> 21	659	81	740	253	189	14100	2330	3200	365
Ni + <i>P. putida</i> 23	621	77	740	262	190	14100	2330	3400	341
HCP <sub>05</sub>	81	12	110	22	28	2500	480	520	44

сидерофоры способны влиять на подвижность в почве и биодоступность металлов в результате процессов подкисления, комплексообразования, осаждения и восстановления. В зависимости от состава и концентрации продуцируемых сидерофоров ризосферными микроорганизмами, а также свойств металла, возможно как увеличение, так и уменьшение его подвижности [12].

Обнаруженные при уборке большая масса подвергнутых никелевому стрессу растений и их устойчивость к токсическому действию ТМ при внесении ризобактерий могли быть обусловлены также увеличением выноса из загрязненной почвы биофильных элементов зерном, соломой и корневой системой а, следовательно, улучшением минерального питания растений. Микробы, ассоциированные с растениями, могут стимулировать их рост, оказывая положительное влияние на минеральное питание, в том числе в условиях стресса, вызванного ТМ [13]. Увеличение выноса элементов минерального питания инокулированными бактериями растениями яровой пшеницы при выращивании до полной спелости происходило в целом без существенных изменений содержания большинства элементов в надземных органах, в том числе в зерне и в корнях. Следовательно, внесение бактерий увеличило накопление питательных элементов в растениях при загрязнении почвы Ni вследствие стимуляции их роста и увеличения урожая.

### ВЫВОДЫ

1. Внесение ростстимулирующих ризосферных бактерий *P. fluorescens* 20, *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23 способствовало росту растений яровой пшеницы и повышало их устойчивость к токсическому действию Ni при искусственном загрязнении ТМ агросерой почвы в дозе 200 мг/кг почвы. Применение бактерий увеличило массу зерна, соломы и корней загрязненных растений и полностью устранило фитотоксичность ТМ.

2. Инокуляция бактериями усилила фитотоксичность Ni, увеличивая вынос ТМ из загрязненной почвы надземной биомассой, без значимых изменений его содержания в зерне и соломе. Под влиянием бактерий увеличилось содержание и накопление Ni в корневой системе, при инокуляции *P. putida* 23 — в наибольшей степени.

3. Положительное действие и устойчивость растений к токсическому действию Ni при инокуляции бактериями было обусловлено: а) — усилением барьера корневой системы по отношению к поступлению ТМ в надземную биомассу и б) — улучшением минерального питания инокулиро-

ванных бактериями растений (увеличением выноса ими из загрязненной почвы большинства биофильных элементов).

4. Увеличение выноса биофильных элементов растениями, инокулированными бактериями, из загрязненной почвы происходило вследствие стимуляции роста растений и увеличения урожая, в целом без существенных изменений содержания элементов в надземных органах.

5. Увеличение выноса Ni растениями при внесении бактерий происходило без существенных изменений реакции почвенной среды и, вероятно, было обусловлено образованием бактериальных сидерофоров.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят ЦКП ИФХиБПП РАН за выполнение химических анализов почвы и определение зольных элементов в растворах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейтрализация загрязненных почв // Под ред. Мажайского Ю.А. Рязань: Мещерск. ф-л ВНИИГиМ РАСХН, 2008. 528 с.
2. *Burd G.I., Dixon D.G., Glick B.R.* A plant growth-promoting bacterium that decreases nickel toxicity in seedlings // *App. Environ. Microbiol.* 1998. V. 64. № 10. P. 3663–3668.
3. *Dorjey S., Dolkar D., Sharma R.* Plant growth promoting rhizobacteria *Pseudomonas*: A review // *Inter. J. Curr. Microbial. App. Sci.* 2017. V. 6. № 7. P. 1335–1344. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.602.160>
4. *Анохина Т.О., Сиунова Т.В., Сизова О.И., Захарченко Н.С., Кочетков В.В.* Ризосферные бактерии рода *Pseudomonas* в современных агробιοтехнологиях // *Агрохимия.* 2018. № 10. С. 54–66. <https://doi.org/10.1134/S0002188118100034>
5. *Farwell A.J., Vesely S., Nero V., Rodrigues H., Shah S., Dixon D.G., Glick B.R.* The use of transgenic canola (*Brassica napus*) and plant growth-promoting bacteria to enhance plant biomass at a nickel-contaminated field site // *Plant and Soil.* 2006. V. 288. № 1–2. P. 309–318. DOI: 1007/s11104-006-9119-y
6. *Farwell A.J., Vesely S., Nero V., Rodrigues H., McCormack K., Shah S., Dixon D.G., Glick B.R.* Tolerance of transgenic canola plants (*Brassica napus*) amended with plant growth-promoting bacteria to flooding stress at a metal-contaminated field site // *Environ. Pollut.* 2007. V. 147. № 3. P. 540–545. DOI: . 2006.10.014 <https://doi.org/10.1016/j.envpol>
7. *Шабаев В.П., Остроумов В.Е.* Влияние стимулирующих рост растений ризосферных бактерий на устойчивость яровой пшеницы к токсическому действию никеля при загрязнении агросерой почвы // *Агрохимия.* 2021. № 11. С. 87–94. <https://doi.org/10.31857/S0002188121090106>

8. Шабает В.П. Почвенно-агрохимические аспекты ремедиации загрязненной свинцом почвы при внесении стимулирующих рост растений ризосферных бактерий // Почвоведение. 2012. № 5. С. 601–611.
9. 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. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20060118>
10. Rajkumar M., Freitas H. Effects of inoculation of plant-growth promoting bacteria on Ni uptake by Indian mustard // Bioresource Technol. 2008. V. 99. Iss. 9. P. 3491–3498. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.07.046>
11. Ma Y., Rajkumar M., Luo Y., Freitas H. Inoculation of endophytic bacteria on host and non-host plants-effects on plant growth and Ni uptake // J. Hazard. Mater. 2011. V. 195. P. 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.08.034>
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. // Front. Microbiol. 06 September 2017. Article 1706. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01706>
13. Chandel A.K., Chen H., Sharma H.Ch., Adhikari K., Gao B. Beneficial microbes for sustainable agriculture // Microbes for sustainable development and bioremediation. 1 st ed. Chapter 15. P. 257–266 / Eds. Chandra R., Sobti R.C. Boca Raton: CRC Press, 2020. 386 p. <https://DOI.org/10.1201/9780429275876>

## Influence of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria on Spring Wheat Yield under Agrogray Soil Contamination with Ni

V. P. Shabayev<sup>a,#</sup>, V. E. Ostroumov<sup>a</sup>, and M. P. Volokitin<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, RAS  
ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

<sup>b</sup>*Institute Basic Biological Problems, RAS  
ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: vpsh@rambler.ru*

Influence of application of plant growth-promoting rhizobacteria of the genus *Pseudomonas* on the yield of spring wheat when plants are grown up to maturity in agrogray soil artificially contaminated with Ni in pot experiment was studied. The resistance of plants to heavy metal toxicity was estimated when bacteria were introduced. Chemical composition of plants and uptake of Ni and biophilic elements by aboveground biomass, including grain and by root system of bacterially inoculated plants were determined.

*Key words:* *Pseudomonas*, *T. aestivum* L., NiCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O, chemical composition of plants.