

УДК 632.122.1:546.56:633.11“321”:631.461

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАСТЕНИЙ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ К ТОКСИЧНОСТИ МЕДИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ РОСТСТИМУЛИРУЮЩИХ РИЗОСФЕРНЫХ БАКТЕРИЙ НА ЗАГРЯЗНЕННОЙ МЕТАЛЛОМ ПОЧВЕ[§]

© 2024 г. В. П. Шабает^{1,*}, В. Е. Остроумов¹¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
142290 Пушкино Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

*E-mail: vpsh@rambler.ru

В вегетационном опыте исследовано влияние применения ростстимулирующих ризосферных бактерий рода *Pseudomonas* на рост растений яровой пшеницы при искусственном загрязнении агросерой почвы медью в повышенной концентрации. Установлено повышение устойчивости растений к токсическому действию металла при внесении бактерий. Определены элементный химический состав растений и накопление Cu и биофильных элементов N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn и Mn в вегетативной массе и корнях. Положительное действие бактерий на рост растений при загрязнении почвы Cu обусловлено увеличением поступления в растения питательных элементов из почвы, содержания и накопления металла в корнях, что свидетельствовало об ответной протекторной реакции растений на загрязнение почвы Cu. Бактерии увеличили вынос Cu вегетативными органами растений из загрязненной почвы – усилили фитоэкстракцию без изменений реакции почвенной среды.

Ключевые слова: бактерии *Pseudomonas*, *Triticum aestivum* L., Cu(NO₃)₂·3H₂O, агросерая почва, биомасса, химический состав растений.

DOI: 10.31857/S0002188124090087, **EDN:** CCOENF

ВВЕДЕНИЕ

Медь (Cu) является одним из биологически значимых и необходимых элементов для растений [1], однако при повышенных концентрациях может оказывать токсическое действие [2–4]. В избыточных концентрациях Cu негативно влияет на рост растений, ингибирует фотосинтез и физиологические процессы в растениях и уменьшает урожай [2]. Фитотоксичность загрязненной Cu почвы, которая, как правило, приводит к нарушению физиолого-биохимических процессов в растениях, проявляется в снижении количества и качества величины биомассы растений [2–4]. Влияние загрязнения почвы Cu на растения и биохимические показатели растений зависело от дозы внесенного металла, вида растения и типа почвы [3, 4]. Избыточное содержание в почве доступных соединений тяжелых металлов (ТМ), оказывая негативное влияние на основные физиолого-биохимические

процессы в растениях, может приводить в том числе к нарушению поступления в них биофильных элементов [5–7].

Для восстановления загрязненных ТМ почв используют процесс биоремедиации, который включает в себя применение микроорганизмов, растений и ассоциированных с растениями микроорганизмов [8, 9]. Биоремедиация является экономически выгодным и эффективным методом восстановления почв [9–11]. Применение стимулирующих рост растений ризосферных бактерий играет важную роль в повышении толерантности растений к токсическому действию повышенных концентраций в почве ТМ [12]. Кроме того, процесс фиторемедиации, основанный на применении растений, является одним из лучших способов удаления загрязнителей, в том числе ТМ из почвы, эффективность которого усиливается при совместном использовании растений с ризобактериями [12]. Бактерии, принадлежащие к роду *Pseudomonas*, привлекают особое внимание из-за их огромных возможностей по усилению роста и развития растений как в нормальных, так и стрессовых условиях, в том числе при загрязнении почв

[§] Работа выполнена в рамках госзадания “Физико-химические и биогеохимические процессы в антропогенно измененных почвах”, АААА-А18-118013190180-9 и ААА-А18-118013190181-6.

ТМ [13, 14]. Сообщают, что *Pseudomonas* обладают высокой устойчивостью к металлам и способностью к биоремедиации, в том числе в ассоциациях с различными видами растений [8]. Установлены значительная стимуляция роста растений подсолнечника и увеличение поглощения Си вегетативной биомассой и корнями после инокуляции бактерией *P. lurida* штаммом ЕОО26 на фоне загрязнения почвы $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ [15]. Однако в настоящее время по-прежнему недостаточно изучены механизмы детоксикации ТМ в ризосфере при внесении эффективных ризосферных бактерий. Установлено, что стимулирование роста растений при загрязнении почвы Си при применении бактерий рода *Pseudomonas* происходит в том числе вследствие улучшения минерального питания растений [5–7]. Исследований влияния вышеупомянутых бактерий на рост, минеральное питание растений при загрязнении почвы Си проведено относительно недостаточно.

Цель работы – изучение влияния ростостимулирующих ризосферных бактерий рода *Pseudomonas* на рост растений яровой пшеницы и элементный химический состав растений, включая содержание в них Си, при загрязнении почвы металлом в повышенной концентрации.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Растения яровой пшеницы *T. aestivum* L. сорта Злата (селекция Московского НИЦ “Немчиновка”) выращивали на агросерой почве юга Московской обл. в вегетационном опыте при искусственном загрязнении почвы водорастворимым соединением Си. В сосудах, содержащих 0.8 кг почвы, выращивали по 9 растений до фазы выхода в трубку в течение 27 сут. В контрольном варианте растения выращивали без внесения Си и бактерий, в другом варианте – с внесением Си без бактерий, в остальных вариантах – на фоне загрязнения почвы Си с внесением каждой бактерии. В вариантах с загрязнением Си вносили 300 мг/кг в виде $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ квалификации “хч” (Реахим, Россия). Это соответствовало 2.3 ориентировочно-допустимой концентрации (ОДК) для данного типа почв [16]. 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 NH_4NO_3 в такой же дозе, какая была использована в загрязненных вариантах. Таким образом, доза азота была выровнена и одинакова во всех вариантах опыта. Растения во всех вариантах выращивали на фоне внесения РК-удобрений в виде однозамещенного фосфорнокислого калия и сернокислого калия по 106 мг д.в./сосуд, исходя из соотношения N : P : K = 1 : 1 : 1. Все соли были внесены за 10 сут до посева семян. В работе испытывали влияние бактерий,

стимулирующих рост и повышающих урожай различных культурных: бактерии *P. fluorescens* штамм 20, бактерии *P. fluorescens* штамм 21 и бактерии *P. putida* штамм 23 на накопление биомассы растениями, содержание в них Си и других биофильных элементов [17]. При посеве стерилизованные, пророщенные семена раскладывали на почву, инокулировали водными суспензиями чистых культур бактерий в водопроводной воде из расчета 10^8 клеток/растение и засыпали 3-см слоем почвы. В вариантах без внесения бактерий применяли аналогичным образом адекватное количество автоклавированных бактериальных суспензий. В опыте была использована пахотная, среднесуглинистая агросерая почва (Luvic Retic Greyzem-ic Phaeozems (Loamic), слой 0–20 см), на которой в предшествующий год выращивали ячмень. Почва имела следующие показатели: pH_{KCl} 6.14, $\text{C}_{\text{орг}}$ – 0.95%, $\text{N}_{\text{вал}}$ – 0.15%, обменные основания Ca – 11.06, Mg – 1.52, K – 0.45 м/моль(+), подвижные P_2O_5 и K_2O (0.2 н. HCl) – 7.37 и 11.2 мг/100 г почвы соответственно. Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ и $\text{N}_{\text{вал}}$ в почве определяли на анализаторе vario EL cube 19.10-0000 (Германия), pH_{KCl} – на pH-метре pH 325-B (WTW, Германия). Влажность почвы в сосудах в течение вегетационного периода поддерживали поливами на уровне $\geq 60\%$ ПВ (21 мас.%). Повторность опыта четырехкратная.

Вегетативную массу растений убирали в фазе трубкования, корни отмывали от почвы водопроводной, а затем промывали дистиллированной водой. Растительный материал сушили при 70°C и взвешивали. Вегетативную массу и корни (по 0.5 г) озоляли в смеси концентрированных кислот $\text{HNO}_3 : \text{HClO}_4 = 2 : 1$ и анализировали на содержание Си и P, K, Ca, Mg, Fe, Mn и Zn. Содержание Си и других зольных элементов (кроме калия) в растворах определяли методом эмиссионно-оптической спектроскопии индуктивно-связанной плазмы на спектрометре ICP-OES 5110 (Agilent, США). Калий определяли методом пламенной фотометрии на пламенном фотометре BWB XP (BWB, Великобритания), pH – на приборе pH 325-B (WTW, Германия). После сжигания растительного материала (0.1 г) в разбавленной серной кислоте (1 : 2) с катализатором ($\text{K}_2\text{SO}_4 : \text{Zn} : \text{Se} : \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = 100 : 24 : 2 : 0.2$) определяли содержание в растениях валового азота феноловым методом. Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием пакета MS Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При загрязнении почвы Си установлено ингибирование роста яровой пшеницы в фазе выхода в трубку (табл. 1).

Это выражалось в уменьшении массы вегетативных органов и целых растений на 24–26% относительно контроля – варианта без загрязнения металлом и внесения бактерий. Масса корней в условиях Си-стресса уменьшилась в еще большей степени – на 33%. Применение всех бактерий уменьшало токсическое действие металла на растения. При внесении бактерий вегетативная масса растений, подвергнутых Си-стрессу, была на 13–16% больше в сравнении с вариантом с загрязнением почвы металлом без внесения бактерий. Бактерии при загрязнении Си также способствовали лучшему росту корневой системы – масса корней загрязненных растений в вариантах со всеми бактериями увеличилась на 20–24%. При применении бактерий вегетативная масса растений достигала 86–88% в сравнении с незагрязненными инокулированными растениями – контролем, а корневая масса составляла 80–84%.

В табл. 2 представлено содержание Си в растениях. Загрязнение Си почвы как без, так и при внесении бактерий существенно, до полутора раз увеличилось значения этого показателя в вегетативной массе.

При загрязнении почвы Си его содержание в корневой системе увеличилось в значительно большей степени, чем в вегетативной массе. В варианте без внесения бактерий этот показатель увеличился в 17 раз, при внесении бактерий – в 18–19 раз по сравнению с контролем. Относительно варианта с загрязнением Си без бактерий содержание металла 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%. В корнях вне зависимости от внесения бактерий содержалось более чем на порядок больше Си, чем в надземной биомассе.

Загрязнение почвы Си без внесения бактерий не оказывало влияния на потребление или вынос металла (в мкг/сосуд) вегетативной массой из почвы относительно контроля (табл. 3).

Применение бактерий в загрязненных условиях увеличило этот показатель для вегетативной массы растений на 21–30%, в наибольшей степени в варианте с *P. fluorescens* 21 в сравнении с вариантом с загрязнением металлом без бактерий. Таким образом, внесение бактерий усилило фитоэкстракцию – очистку загрязненной почвы. При загрязнении почвы Си наиболее значительно увеличился вынос металла корневой системой: в варианте без бактерий – в 11 раз, в вариантах с бактериями – в 14–15 раз относительно контроля. Под влиянием бактерий вынос Си корнями в загрязненных условиях увеличился на 32–39%, аналогичные закономерности отмечены и для целых растений: соответственно 4- и 6-кратное увеличение и увеличение на 32–36%. Потребление Си корнями было более чем на порядок больше в сравнении с вегетативной биомассой вследствие значительно большего содержания металла в корневой системе.

Таблица 1. Биомасса растений яровой пшеницы в фазе трубкования

Вариант	Вегетативная масса	Корни	Целое растение
	сухое вещество, г/сосуд		
Без Си и внесения бактерий – контроль	2.65	0.61	3.26
Си без внесения бактерий	2.01	0.41	2.42
Си + <i>P. fluorescens</i> 20	2.32	0.50	2.82
Си + <i>P. fluorescens</i> 21	2.28	0.49	2.77
Си + <i>P. putida</i> 23	2.33	0.51	2.84
НСП ₀₅	0.26	0.08	0.34

Таблица 2. Содержание Си в растениях в фазе трубкования

Вариант	Вегетативная масса	Корни
	содержание Си, мг/кг растительного материала	
Без Си и внесения бактерий – контроль	11	24
Си без внесения бактерий	15	399
Си + <i>P. fluorescens</i> 20	15	456
Си + <i>P. fluorescens</i> 21	17	441
Си + <i>P. putida</i> 23	15	440

Примечание. Ошибки определения содержания Си не превышали 15%.

Таблица 3. Потребление Cu растениями в фазе трубкования

Вариант	Вегетативная масса	Корни	Целое растение
	потребление Cu, мкг/сосуд		
Без Cu и внесения бактерий – контроль	29	15	143
Cu без внесения бактерий	30	164	194
Cu + <i>P. fluorescens</i> 20	35	228	263
Cu + <i>P. fluorescens</i> 21	39	216	2555
Cu + <i>P. putida</i> 23	35	224	259
<i>HCP</i> ₀₅	4	31	40

В табл. 4 представлены данные по содержанию биофильных элементов в растениях в фазе трубкования после завершения опыта.

Загрязнение почвы Cu вне зависимости от внесения бактерий оказало влияние на содержание отдельных элементов в растениях, что свидетельствовало о влиянии повышенной концентрации Cu на метаболические процессы в растениях. В загрязненных условиях без внесения бактерий относительно контрольного варианта в вегетативной массе уменьшилось содержание N и P, напротив, увеличилось содержание K и Ca и не обнаружено значимых изменений этого показателя для остальных элементов. В корнях загрязненных неинокулированных растений эти зависимости сохранялись, кроме значительного уменьшения содержания в них K, в отличие от вегетативной массы. В загрязненных растениях вне зависимости от внесения бактерий уменьшилось содержание фосфора как в вегетативной массе, так и в корнях. Отмечено проявление антагонизма меди и фосфора, что, вероятно, было связано со свойством избыточных концентраций Cu ингибировать в растениях активность фермента фосфатазы, определяющей доступность фосфора растениям [18]. Увеличение концентрации K и Ca в растениях в загрязненных вариантах могло быть связано с возрастанием подвижности этих элементов в почве при внесении в почву высокой дозы Cu, а также значимым при этом уменьшением массы растений и возможным нарушением механизмов поглощения ими элементов. Внесение всех бактерий при загрязнении почвы Cu по сравнению с вариантом без бактериальных инокуляций в загрязненных условиях не оказало существенного влияния на содержание в вегетативных органах и корнях практически всех изученных биофильных элементов, за исключением достоверного увеличения этого показателя для K в обеих частях растений.

При загрязнении почвы Cu без применения бактерий установлено значительное уменьшение поглощения из почвы или накопления вегетативной массой и целыми растениями практически всех исследованных элементов, за исключением Ca и K,

для которых этот показатель не был подвергнут значительным изменениям (табл. 5). В корнях в условиях Cu-стресса без применения бактерий зафиксировано уменьшение накопления всех элементов. Внесение данных бактерий в загрязненных условиях значительно увеличило потребление всех биофильных элементов растениями в сравнении с вариантом загрязнения Cu без применения бактерий. Эта закономерность была обнаружена как для вегетативной массы, так и для корневой системы. Уменьшение токсического действия Cu и увеличение при этом биомассы инокулированных бактериями растений (табл. 1) несомненно было связано с увеличением потребления биофильных элементов растениями из почвы – улучшением их минерального питания. В нашем исследовании бактерии не обеспечили увеличения потребления питательных элементов загрязненными металлом растениями до уровня в контрольном варианте. Следует отметить, что в корнях во всех вариантах опыта накапливалось примерно на порядок больше Fe, чем в вегетативной массе, что, вероятно, было обусловлено биологическими особенностями яровой пшеницы. Аналогичная закономерность была ранее установлена для этой культуры в фазе трубкования [7]. Увеличение потребления биофильных элементов растениями из загрязненной почвы при внесении всех бактерий происходило без существенных изменений в растениях содержания в целом практически всех биофильных элементов вследствие стимуляции роста растений и увеличения растительной биомассы. Стимуляция роста растений под влиянием бактерий рода *Pseudomonas* происходит в том числе вследствие продуцирования ими физиологически активных веществ – фитогормонов, в частности, индолилуксусной кислоты [19], что также было обнаружено нами в предыдущих исследованиях [20].

При загрязнении почвы Cu в вариантах с внесением бактерий после удаления растений в фазе трубкования по сравнению с вариантом с загрязнением почвы без внесения бактерий не установлено значимых изменений реакции почвенной среды (табл. 6), которая, как известно, оказывает

Таблица 4. Содержание биофильных элементов в растениях в фазе трубкования

Вариант	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn
	%					мг/кг		
Вегетативная масса								
Без Cu и внесения бактерий – контроль	4.21	0.51	3.76	0.92	0.27	113	54	33
Cu без внесения бактерий	3.90	0.40	4.49	1.23	0.26	106	57	26
Cu + <i>P. fluorescens</i> 20	3.99	0.40	4.94	1.19	0.27	112	57	25
Cu + <i>P. fluorescens</i> 21	4.21	0.42	4.99	1.24	0.28	110	58	28
Cu + <i>P. putida</i> 23	4.01	0.38	4.83	1.18	0.27	105	54	25
Корни								
Без Cu и внесения бактерий – контроль	2.74	0.46	1.74	1.10	0.51	0.58	187	89
Cu без внесения бактерий	2.14	0.35	1.19	1.56	0.55	0.50	176	70
Cu + <i>P. fluorescens</i> 20	2.14	0.36	1.33	1.63	0.62	0.60	201	75
Cu + <i>P. fluorescens</i> 21	2.30	0.39	1.51	1.37	0.58	0.55	195	72
Cu + <i>P. putida</i> 23	2.25	0.38	1.35	1.47	0.50	0.57	189	77

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

Таблица 5. Потребление биофильных элементов растениями в фазе трубкования

Вариант	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn
	мг/сосуд				мкг/сосуд			
Вегетативная масса								
Без Cu и внесения бактерий — контроль	112	14	100	24	715	300	143	88
Cu без внесения бактерий	78	8	90	25	522	213	115	52
Cu + <i>P. fluorescens</i> 20	93	9	115	28	626	260	132	58
Cu + <i>P. fluorescens</i> 21	96	10	114	28	638	251	132	64
Cu + <i>P. putida</i> 23	94	9	113	28	629	245	126	58
HCP ₀₅	12	1	20	3	89	30	10	6
Корни								
Без Cu и внесения бактерий — контроль	17	3	11	7	311	3580	114	54
Cu без внесения бактерий	9	1	5	6	226	2050	72	29
Cu + <i>P. fluorescens</i> 20	11	2	7	8	310	3000	101	38
Cu + <i>P. fluorescens</i> 21	11	2	7	7	284	2700	96	35
Cu + <i>P. putida</i> 23	12	2	7	8	255	2910	96	39
HCP ₀₅	2	1	1	1	25	512	17	7
Целое растение								
Без Cu и внесения бактерий — контроль	129	17	111	31	1070	3880	257	142
Cu без внесения бактерий	87	9	95	31	748	2260	187	81
Cu + <i>P. fluorescens</i> 20	104	11	122	36	936	3260	233	96
Cu + <i>P. fluorescens</i> 21	107	12	121	35	922	2950	228	99
Cu + <i>P. putida</i> 23	108	11	120	35	884	3150	222	97
HCP ₀₅	14	2	15	4	110	460	34	13

Таблица 6. Реакция почвенной среды после выращивания растений (фаза трубкования)

Вариант	pH _{KCl} почвенной суспензии
Без Cu и внесения бактерий – контроль	6.14 ± 0.02
Cu без внесения бактерий	6.17 ± 0.02
Cu + <i>P. fluorescens</i> 20	6.19 ± 0.07
Cu + <i>P. fluorescens</i> 21	6.14 ± 0.07
Cu + <i>P. putida</i> 23	6.20 ± 0.05

Примечание. Средние 4-х повторностей опыта ± отклонение от среднего.

значительное влияние на подвижность химических элементов в почве.

Загрязнение почвы Cu без бактериальных инокуляций также не оказывало значимого влияния на данный показатель. Следовательно, увеличение аккумуляции Cu в растениях – усиление фитоэкстракции под влиянием бактерий – происходило без существенных изменений реакции почвенной среды и, вероятно, было обусловлено продуцируемыми бактериями органическими экзометаболитами – сидерофорами, свойственными флуоресцирующим видам *Pseudomonas* [14, 19, 21]. Увеличение поступления Cu в растения при внесении ризосферных бактерий, вероятно, было связано с увеличением биодоступности металла в почве вследствие образования бактериальных сидерофоров.

ВЫВОДЫ

1. Внесение ростостимулирующих ризосферных бактерий *P. fluorescens* 20, *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23 в искусственно загрязненную Cu агросерую почву в дозе 300 мг/кг почвы уменьшило фитотоксичность Cu в фазе трубкования, стимулировало рост растений яровой пшеницы и увеличило массу вегетативных органов и корней. Применение бактерий не устраняло полностью токсическое действие на растения металла, внесенного в повышенной концентрации.

2. Внесение бактерий в загрязненную Cu почву значительно увеличило потребление, или вынос, металла вегетативной массой растений из почвы – усилило фитоэкстракцию в максимальной степени при применении *P. fluorescens* 21. Загрязнение почвы Cu вне зависимости от бактерий увеличило концентрацию металла в вегетативной массе растений.

3. Повышение устойчивости растений к токсическому действию Cu при внесении бактерий было обусловлено улучшением минерального питания растений – увеличением потребления вегетативной массой и корневой системой из загрязненной почвы макроэлементов N, P, K, Ca и Mg, Fe и микроэлементов Mn и Zn и содержания и накопления Cu в корнях. Это свидетельствовало об ответной протекторной реакции растений на загрязнение почвы Cu.

4. Увеличение потребления изученных биофильных элементов растениями яровой пшеницы из загрязненной почвы при внесении бактерий происходило вследствие стимуляции роста и увеличения растительной биомассы, без существенных изменений в целом содержания практически всех элементов в растениях, за исключением содержания K.

5. Загрязнение почвы Cu без внесения бактерий уменьшило потребление растениями большинства биофильных элементов и ингибировало рост растений.

6. Внесение бактерий в загрязненных условиях не сопровождалось значимыми изменениями реакции почвенной среды.

Авторы благодарят ЦКП ИФХиБПП РАН за выполнение химических анализов почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин В.Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва–растение. Новосибирск: СО РАН, 2012. 220 с.
2. Демидчик В.В., Соколик А.И., Юрин В.М. Токсичность избытка меди и толерантность к нему растений // Усп. совр. биол. 2001. Т. 121. № 5. С. 511–525.
3. Цыгвинцев П.Н., Гончарова Л.И., Рачкова В.М. Ответная реакция ячменя в онтогенезе на загрязнение почв медью // Усп. совр. естествознания. 2018. № 11. С. 305–310.
4. Гончарова Л.И., Цыгвинцев П.Н., Манин К.В. Реакция различных культур на загрязнение почвы медью // Агрохимия. 2018. № 4. С. 88–94. DOI: 10.7868/S0002188118040129
5. Шабает В.П. Почвенно-агрохимические аспекты ремедиации загрязненной свинцом почвы при внесении стимулирующих рост растений ризосферных бактерий // Почвоведение. 2012. № 5. С. 601–611.
6. 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. DOI: 10.31857/S0032180X20060118

7. Шабает 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
8. Saha L., Tiwari J., Baudh K., Ma Y. Recent developments in microbe–plant–based bioremediation for tackling heavy metal-polluted soils. Review article // Front. Microbiol. Sec. Microbiotechnol. 2021. V. 12. Dec 23:12:731723.
DOI: 10.3389/fmicb.2021.731723
9. Ojha S., Jaiswal S., Thakur P., Mishra S.K. Bioremediation techniques for heavy metal and metalloid removal from polluted lands: a review // Inter. J. Sci. Technol. 2023. V. 20. P. 10591–10612.
DOI: 10.1007/s13762-022-04502-3
10. Singh S.N., Goyal S.K., Singh S.R. Bioremediation of heavy metals polluted soils and their effect on plants // Agriways. 2015. V. 3. № 1. P. 19–24.
11. Singh P.K. Effect of soil polluted by heavy metals: Effect on plants, bioremediation and adaptive evolution in plants // Plant Responses to Soil Pollution / Eds. Singh P., Singh S.K., Prasad S.M. 2020. P. 89–102.
DOI: 10.1007/978-981-15-4964-9_5
12. Nadeem N., Asif R., Ayyub S., Salman S., Shafique F., Ali Q., Malik A. Role of rhizobacteria in phytoremediation of heavy metals. Review Article // Biol. Clinic. Sci. Res. J. (Biol. Clin. Sci. Res. J.). 2020. V. 35. P. 1–5.
DOI: 10.54112/bcsrj.v2020i1.35
13. Nadeem S., Naveed M., Ayyub M., Khan M.Y., Ahmad M., Zahir Z.A. Potential, limitations and future prospects of *Pseudomonas* spp. for sustainable agriculture and environment: A Review // Soil Environ. 2016. V. 35. № 2. P. 106–145.
14. Dorjey S., Dolkar D., Sharma R. Plant growth promoting rhizobacteria *Pseudomonas*: A review // Inter. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci. 2017. V. 6. № 7. P. 1335–1344.
DOI: 10.20546/ijcmas.2017.602.160
15. Kumar A., Tripti C., Voropaeva O., Maleva M., Panikovskaya K., Borisova G., Rajkumar M., Bruno L.B. Bioaugmentation with copper tolerant endophyte *Pseudomonas purida* strain EOO26 for improved plant growth and copper phytoremediation by *Helianthus annuus* // Chemosphere. 2021. V. 266. 128983.
DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128983
16. Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2042-06. М.: Фед. центр гигиены и эпидемиол. Роспотребнадзора, 2006. 11 с.
17. Шабает В.П. Микробиологическая азотфиксация и рост растений при внесении ризосферных микроорганизмов и минеральных удобрений // Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв. М.: Наука, 2006. С. 195–211.
18. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. 548 p.
DOI: 10.1201/b10158
19. Ullah A., Heng S., Munis M.F.H., Fahad S., Yang X. Phytoremediation of heavy metals assisted by plant growth promoting (PGP) bacteria: A review // Environ. Exp. Bot. 2015. V. 117. P. 28–40.
20. Олюнина Л.Н., Шабает В.П. Продукция индолил-3-уксусной ризосферными бактериями рода *Pseudomonas* в процессе роста // Микробиология. 1996. Т. 65. № 6. С. 813–817.
21. Seraj F., Rahman T. Heavy metals, metalloids, their toxic effect and living systems // Am.J. Plant Sci. 2018. V. 9. № 13. P. 2626–2643.
DOI: 10.4236/ajps.2018.913191

Increasing of Spring Wheat Plant Resistance to Copper Toxicity by Application of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria on Metal-Contaminated Soil

V. P. Shabayev^{a, #}, V. E. Ostroumov^a

^a*Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of RAS,
ul. Institutskaya 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

[#]*E-mail: vpsh@rambler.ru*

Effects of plant growth-promoting rhizobacteria of the *Pseudomonas* genus application on growth of spring wheat plants was studied in pot experiment on agrogrey soil artificially contaminated with Cu in increased concentration. Increasing of plants resistance to metal toxicity by application of bacteria was found. Chemical composition of plants and uptake of Cu and biophilic elements N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn and Mn by shoots and roots were determined. Positive effect of bacteria on plant growth in contamination of soil with Cu is due to increase in nutrient uptake by plants from soil, concentration and accumulation of metal in roots that indicates protective response reaction of plants to soil contamination with Cu. Bacteria increased Cu uptake by plant shoots from contaminated soil – enhanced phytoextraction without changes in soil medium reaction.

Keywords: bacteria *Pseudomonas*, *T. aestivum* L., $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, agrogrey soil, chemical composition of plants.