

УДК 631.461.74:546.28:632.122.1

## РОЛЬ СИЛИКАТНЫХ РИЗОБАКТЕРИЙ В БИОСОРБЦИИ КРЕМНИЯ В СИСТЕМЕ ПОЧВА–РАСТЕНИЕ ПРИ ПОЛИЭЛЕМЕНТНОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ ПОЧВ<sup>1</sup>

© 2019 г. М. Г. Соколова<sup>1,\*</sup>, Г. А. Белоголова<sup>2,\*\*</sup>, Г. П. Акимова<sup>1</sup>, О. Б. Вайшля<sup>3,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН  
Иркутск, ул. Лермонтова, 132, Россия

<sup>2</sup> Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН  
664033 Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050 Томск, просп. Ленина, 36, Россия

\*E-mail: SokolovaMG@sifibr.irk.ru

\*\*E-mail: gabel@igc.irk.ru

\*\*\*E-mail: planta@mail.tomsknet.ru

Поступила в редакцию 30.01.2018 г.

После доработки 24.04.2018 г.

Принята к публикации 12.10.2018 г.

Установлено, что морфогенез исследованных злаковых растений и миграция биофильного элемента кремния зависели от уровня техногенной нагрузки почвы и воздействия ризосферных бактерий. На загрязненных тяжелыми металлами почвах обнаружено значительное торможение ростовых процессов растений по сравнению с выращенными на окультуренных почвах. Инокуляция силикатными бактериями *Bacillus mucilaginosus* способствовала повышению роста злаковых культур и увеличению содержания кремния в растениях во всех вариантах опыта. Предположили, что бактериальная обработка способствовала существенному укреплению стебля и листьев злаков за счет накопления в них кремния, что могло повысить устойчивость растений к полеганию и различным вредным внешним воздействиям.

**Ключевые слова:** силикатные ризобактерии, биосорбция, кремний, система почва–растение, полиэлементное загрязнение почв.

DOI: 10.1134/S0002188119010113

### ВВЕДЕНИЕ

Долгое время в научном мире считалось, что кремний не играет заметной роли в жизнедеятельности живых организмов в виду распространенных представлений о его биологической инертности. С 1960-х гг. стали появляться сведения о важной роли кремния в биологических системах. Существенный вклад в понимание биологической и физиологической активности соединений кремния в живой природе внес М.Г. Воронков – создатель новой отрасли науки – биокремнийорганической химии [1–3].

В настоящее время известно, что кремний непременно входит в химический состав всех растений [2, 4, 5]. Наибольшее количество его находится в растениях степных, полупустынных, пустынных и

горных регионов с наименее благоприятными условиями существования, что характеризует кремний как элемент-адаптер для растений [3, 6]. Особенно высоким содержанием кремнезема (>50%) отличаются хвощи, папоротники и злаки. Представители богатых кремнием растений встречаются и среди многих других семейств, в основном тропической флоры, за счет большого содержания кремния в тканях тропических деревьев они практически не повреждаются насекомыми.

К настоящему времени собрано огромное количество экспериментальных данных, свидетельствующих о необходимости кремния растениям [5]. Добавление в почву или к водной культуре кремнекислоты стимулирует фотосинтетическую активность растений риса, его рост, колошение, созревание [1]. Ростстимулирующее действие кремния на растения используют на практике: кремневые удобрения применяют для повыше-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке базовых проектов НИР VI.56.1.2, РФФИ, грант № 15-05-03919; ГЗ IX.127.1 № 0350-2016-0027.

ния урожайности культурных растений [7–9]. Кроме того, при совместном применении некоторых элементов питания с кремниес кислотой их эффективность значительно повышается, например, эффективность бора, так необходимого для развития бобовых растений [1].

Кремнийорганические соединения проявляют биологическую активность. Они стимулируют биосинтез белка и нуклеиновых кислот, регулируют активность ферментов и гормонов, оказывают защитное действие при гипер- и гипотермии, кислородном голодании и радиационном загрязнении [3]. Особое значение этот элемент имеет для кремнийконцентрирующих растений, к которым принадлежат важнейшие сельскохозяйственные культуры – зерновые. Кремний также укрепляет стебли растений. Существенную роль кремний играет в защите растений от грибных и других заболеваний, а также от вредителей [3]. Внесение в почву кремниевых удобрений обеспечивает поглощение растениями фосфора из обычных трудноусвояемых фосфатов, что связывают с деятельностью силикатных бактерий [2, 3, 7].

Есть сведения, что кремний снижает токсичность ряда элементов. Сравнительно невысокие концентрации марганца токсичны для растений и вызывают появление на листьях коричневых пятен. Соединения кремния подавляют поглощение марганца растениями, при этом устраняя его токсический эффект и увеличивая урожай растений. Аналогичным образом кремнезем способствует снижению токсичности соединений железа, подавляя их ассимиляцию растениями в результате увеличения окисляющей способности корней [10]. Участие кремнезема в питании растений устраняет токсическое действие фенола и фтористоводородной кислоты на сельскохозяйственные культуры, мышьяка – на рис и магнолия – на табак. Применение силикатов подавляет поглощение таких токсичных для растений, животных и человека металлов, как алюминий, кадмий, медь, стронций-90, устраняет вредное влияние засоленности [11, 12].

Восстановить содержание доступных для растений форм кремния в почве могут микроорганизмы, в частности, “силикатные бактерии” [4]. Ранее было показано, что исследованный штамм бактерий *Bacillus mucilaginosus* способен мобилизовать кремний и фосфор из такого объекта литосферы, как фосфоритная руда [13]. Способность микроорганизмов извлекать биогенные элементы из минералов и почвы позволяет использовать бациллы как бактериальные удобрения в системе биологического земледелия, повышающие микробиологическую активность почвы и урожайность растений [13–15].

Тяжелые металлы (ТМ) нарушают комплекс процессов в растении и индуцируют множество специфических и неспецифических реакций. Тогда как микроорганизмы, обладающие полезными для растений свойствами, могут оказывать в стрессовой ситуации позитивный аддитивный или синергический эффект, стимулировать рост и регулировать поступление ТМ в растения из загрязненных почв [16–18].

Цель работы – изучение влияния силикатных ризобактерий *Bacillus mucilaginosus* var. *siliceus* на ростовые характеристики растений пшеницы и овса, а также биосорбцию и биодоступность кремния на техногенно-загрязненных почвах.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведены эксперименты по влиянию ризосферных силикатных бактерий *Bacillus megaterium* var. *siliceus*, входящих в состав биопрепарата кремнебактерин, на изменения морфологических параметров роста злаковых культур пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и овса (*Avena sativa* L.), выращенных в условиях техногенных почв разного уровня загрязнения ТМ.

Исследованный штамм ризосферных бактерий *Bacillus mucilaginosus* var. *siliceus* (№ ВКМ В-1574) находится в коллекции НИЦ “Планта” Томского государственного университета и сдан на хранение в криохранилище “LICONIC” НИИ сельскохозяйственной микробиологии [13].

Биопрепарат кремнебактерин – это жидкий концентрат чистой культуры почвенных силикатных бактерий *Bacillus megaterium*, которые выделяют фермент силиказу и поставляют кремний и другие макро- и микроэлементы из природных силикатов в ризосферу растений. Он является нетоксичным, безопасным для человека и животных стимулятором роста растений и оказывает ряд других позитивных влияний на растения [13].

Биопрепарат разработан в Томском государственном университете и предложен для апробации в агроклиматических условиях Южного Прибайкалья на базе Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН [13].

Вегетационные эксперименты проводили в условиях фитотрона СИФИБР СО РАН (Центр коллективного пользования “Фитотрон” г. Иркутск). Растения пшеницы и овса выращивали на почвах, отобранных из техногенной зоны г. Свирска Иркутской обл., расположенного на берегу р. Ангары (Южное Прибайкалье) на различном удалении от основного источника загрязнения – бывшего Ангарского металлургического завода (АМЗ) по производству мышьяка, расположенного в черте города.

По результатам эколого-геохимических исследований, проведенных ранее в этом городе, были выявлены участки интенсивного загрязнения мышьяком и ТМ различных природных объектов (почвы, растений, животных) в концентрациях, превышающих санитарные нормы [19, 20]. Основными загрязнителями исследованных почв на территории бывшего АМЗ были мышьяк, свинец и кадмий, а также ряд других ТМ, значительно превышающих ПДК [17].

Для эксперимента почва была отобрана на участке 1, расположенном в 500 м от источника загрязнения (окультуренная почва) и на участке 2, максимально загрязненном ТМ, в 10 м от отвала бывшего АМЗ. Более детальная характеристика почв дана в работе [17].

Растения пшеницы и овса выращивали в сосудах, которые вмещали 5 кг почвы. Каждая проба почв была разделена на исходную (контроль) и обработанную силикатными бактериями *B. mucilaginosus* (опыт), на которых выращивали растения в одинаковых условиях. Рабочий раствор бактерий вносили в почву поливом во время посадки в количестве 30 мл/кг почвы. Титр бактерий в рабочем растворе  $KOE = 10^6$  кл./мл. Сосуды поливали водой по весу, в равной степени контрольный и опытный варианты. Растения не достигли зрелого состояния, т.к. на максимально загрязненных техногенных почвах после 25 сут роста они начали высыхать и гибнуть.

Распределение Si изучено в растениях, выращенных на почвах участков 1 и 2, контрастно отличавшихся по содержанию ТМ и мышьяка. Рассчитаны коэффициенты биологического накопления ( $K_b$ ) кремния в растениях по формуле  $C_{Si}$  растения :  $C_{Si}$  почвы (отношение содержания элемента в растении к его содержанию в почве в вытяжках ЭДТА). Хелатные формы микроэлементов играют большую роль в метаболических процессах растений. Эти формы инициируют поступление элементов питания в корни растений и определяют их взаимодействие с ризосферными бактериями [21]. Поэтому в данной работе взяли за основу содержание кремния в почве в вытяжке ЭДТА в виде хелатных соединений. Расчет коэффициентов биологического накопления кремния в растениях произведен относительно его концентрации в почвенных вытяжках ЭДТА.

Анализ почв и растений производили в центре коллективного пользования “Изотопно-геохимических исследований” Института геохимии СО РАН. Из почв, на которых выросли растения, проведена экстракция Si с помощью ЭДТА. Для определения массовой доли Si в пробах сухой почвы и в вытяжках ЭДТА использовали метод атомной абсорбции. Предварительно почву высу-

шивали, просеивали через сито 1 мм и растирали до состояния пудры. Измерения проводили на атомно-абсорбционных спектрометрах модели 403 и 503 фирмы “Perkin-Elmer” (США). Ошибка определения не превышала 5–20%.

Растения высушивали до воздушно-сухого состояния, корни предварительно промывали в проточной воде. Определение химического состава растений выполняли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS. Использован чувствительный ICP-MS прибор с магнитным сектором ELEMENT 2 (“Finnigan MAT”, Germany), обладающий двойной фокусировкой и возможностью регистрации сигнала в различных разрешениях. Ошибка определения не превышала 5–10%. Для контроля правильности результатов анализа использовали стандартные образцы состава (лист березы ЛБ-1, ГСО 8923-2007, элодея канадская ЭК-1, ГСО 8921-2007, травосмесь Тр-1, ГСО 8922-2007), для контроля почв – образцы ССК-1 (серозем карбонатный), СДПС-2 (техногенная почва). Для статистической обработки стабильности результатов анализа использовали расчет стандартного отклонения  $SD$  3-х аналитических измерений на основе программного обеспечения спектрометра “Thermo SPEC” (версия 4.1).

Эксперименты по наблюдению за ростом растений выполнены в 3-х биологических повторностях. В таблицах приведены средние и их стандартные ошибки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что на техногенной почве в первые сутки ростовые параметры растений не отличались от контрольных. Через 10–15 сут роста они снижались у пшеницы и у овса в среднем на 10%. К концу экспозиции рост пшеницы на загрязненной почве тормозился на 20, овса – на 30% (табл. 1). Кроме этого, к концу экспозиции наблюдали пожелтение и усыхание нижних листьев во всех вариантах (5–10%), но более существенно – на почве техногенного участка без инокуляции (до 80%).

Инокуляция почвы бактериями давала увеличение роста растений пшеницы и овса на 8–16% во все периоды экспозиции в вариантах с окультуренной почвой и до 10% – растений пшеницы в вариантах с техногенной почвой. Ростовые параметры растений овса на загрязненной почве при инокуляции практически не менялись, рост растений несколько тормозился.

Обнаружено, что в техногенной почве Si накапливалось больше, чем в окультуренной: в 9 раз – в ризосфере пшеницы и в 6 раз – овса (табл. 2). Инокуляция повлияла по-разному на содержание кремния в ризосфере злаков: в окультуренной

**Таблица 1.** Динамика роста растений зерновых культур (высота, см) при выращивании на почвах разной степени загрязнения

Время, сут	Контроль, H <sub>2</sub> O		Опыт, <i>B. mucilaginosus</i>	
	окультуренная почва 500 м	техногенная почва 10 м	окультуренная почва 500 м	техногенная почва 10 м
	Пшеница			
5	4.5 ± 0.3	7.5 ± 0.4	6.0 ± 0.3	7.5 ± 0.3
10	12.0 ± 1.0	12.0 ± 1.0	13.0 ± 1.1	13.5 ± 1.1
14	17.0 ± 1.3	16.0 ± 1.3	19.0 ± 1.5	18.0 ± 1.4
17	19.5 ± 1.5	18.5 ± 1.4	21.5 ± 1.8	19.0 ± 1.6
20	20.5 ± 1.8	18.5 ± 1.3	22.5 ± 1.7	20.0 ± 1.5
25	22.0 ± 1.8	18.5 ± 1.3	24.0 ± 1.9	20.0 ± 1.3
	Овес			
5	10.5 ± 0.8	10.0 ± 0.8	11.5 ± 0.8	9.0 ± 0.7
10	18.5 ± 1.3	19.0 ± 1.4	22.5 ± 1.8	17.5 ± 1.4
14	19.5 ± 1.4	19.0 ± 1.4	23.0 ± 2.0	18.0 ± 1.4
17	21.0 ± 1.8	19.0 ± 1.4	23.5 ± 2.0	18.5 ± 1.5
20	22.0 ± 1.9	19.5 ± 1.5	24.0 ± 2.0	18.5 ± 1.5
25	24.0 ± 1.9	20.0 ± 1.8	26.0 ± 2.3	20.0 ± 1.7

**Таблица 2.** Содержание Si в вытяжке ЭДТА ризосферной части почвы пшеницы и овса, мг/кг

Культура	Варианты			
	контроль, H <sub>2</sub> O		опыт, <i>B. mucilaginosus</i>	
	окультуренная почва, 500 м от источника загрязнения	техногенная почва, 10 м от источника загрязнения	окультуренная почва, 500 м от источника загрязнения	техногенная почва, 10 м от источника загрязнения
Пшеница	57.8 ± 6.3	542 ± 57	68.1 ± 7.5	209 ± 22
Овес	67.6 ± 7.4	423 ± 48	172 ± 19	722 ± 76

почве содержание Si увеличилось в обоих вариантах, в загрязненной почве под пшеницей его содержание снизилось в 2.6 раза, в ризосфере овса – возросло в 1.7 раза.

Содержание Si в растениях было существенно меньше при выращивании их на техногенной почве (у пшеницы в 3.7–4.6 раза; у овса в 2.0–2.3 раза) по сравнению с окультуренной (табл. 3). Вероятно, происходило связывание элемента в почве в условиях высокой его концентрации, в частности, в виде хелатов, и ограничение его поступления в растения. Это могло быть также обусловлено межэлементным взаимодействием Si с ТМ, присутствовавшим в высоком количестве в почве [21].

При воздействии ризобактерий содержание кремния в обеих культурах возросло во всех вариантах и, особенно, на техногенной почве. Соотношение содержания Si в растениях на окульту-

ренной : техногенной почве при инокуляции снизилось до 2.5 у пшеницы и до 1.5 у овса. При этом обнаружено, что накопление Si в органах растений было больше в корнях, чем в надземной части обоих видов растений. Ранее было показано, что ризобактерии способствовали адсорбции токсикантов, связывая ТМ в ризосфере техногенно-загрязненной почвы и снижая их поступление в растение, но при этом не препятствовали поступлению основных элементов питания, в частности, P, K, S в растения [17, 18], что согласовалось с полученными результатами.

Таким образом, показано, что инокуляция почвы силикатными бактериями приводила к накоплению в растениях кремния, что, очевидно, способствовало укреплению стебля и листьев, и, как отмечено в литературе, обуславливало повышение устойчивости растения к полеганию и различным внешним воздействиям [3, 16].

**Таблица 3.** Содержание Si в растениях зерновых культур при инокуляции *Bacillus mucilaginosus*, мг/кг сухого вещества

Почва	Вариант	Органы растений пшеницы	Si	Влияния инокуляции (% к контролю)
500 м от источника загрязнения, окультуренная	Контроль, H <sub>2</sub> O	Стебель, лист	9700 ± 960	100
		Корень	12400 ± 1200	100
	Опыт, <i>B. mucilaginosus</i>	Стебель, лист	10300 ± 1000	106
		Корень	18200 ± 1800	147
10 м от источника загрязнения, техногенно-загрязненная	Контроль, H <sub>2</sub> O	Стебель, лист	2650 ± 270	100
		Корень	3520 ± 360	100
	Опыт, <i>B. mucilaginosus</i>	Стебель, лист	4760 ± 480	180
		Корень	7060 ± 700	200

**Таблица 4.** Коэффициент бионакопления ( $K_6$ ) кремния в растениях пшеницы и овса при инокуляции *Bacillus mucilaginosus* при различном загрязнении почв

Почва	Вариант	Органы растения	$K_6$ пшеницы	$K_6$ овса	$K_6$ пшеницы : $K_6$ овса
500 м от источника загрязнения	Контроль, H <sub>2</sub> O	Стебель, лист	168	125	1.3
		Корень	214	262	0.8
	Опыт, <i>B. mucilaginosus</i>	Стебель, лист	151	72.4	2.1
		Корень	268	106	2.5
10 м от источника загрязнения	Контроль, H <sub>2</sub> O	Стебель, лист	4.9	8.7	0.6
		Корень	6.5	19.5	0.3
	Опыт, <i>B. mucilaginosus</i>	Стебель, лист	22.7	8.9	2.6
		Корень	33.8	18.8	1.8

При сопоставлении коэффициентов бионакопления кремния между растениями пшеницы и овса выяснилось, что величины  $K_6$  этих злаков были практически равными при выращивании растений на окультуренной почве (табл. 4). Однако на техногенной почве  $K_6$  пшеницы был меньше, чем у овса в 1.8 раза для надземных органов и в 3 раза — для корней.

При инокуляции ризобактериями особенно на техногенной почве  $K_6$  пшеницы существенно вырос: в 4.6 раза для стеблей и в 5.2 раза — для корней, а также был в 2 и более раза больше, чем у овса для вариантов почв. Возможно, пшеница более восприимчива к влиянию бактерий, и при бактериализации в растениях пшеницы аккумуляция кремния происходила гораздо интенсивнее, особенно на загрязненной почве.

При сопоставлении коэффициентов бионакопления кремния в исследованных злаковых растениях, выращенных на почвах разной степени загрязненности ТМ показано, что величины  $K_6$  были существенно меньше в условиях техногенно-загрязненной почвы: более чем в 30 раз — пшеницы и более чем в 10 раз — овса (табл. 5). Инокуляция кремнебактериями уменьшала этот

разрыв до 6–8 раз, т.е. бактериализация способствовала биосорбции кремния в растениях, повышая бионакопление Si особенно в растениях пшеницы, что может способствовать увеличению устойчивости растений в условиях техногенного загрязнения ТМ [3, 16].

Биохимические аспекты метаболизма кремния до сих пор не изучены. Полагают, что в силикатных бактериях есть ферменты силиказы, ответственные за разрушение связей Si-O в кристаллических решетках глинистых минералов, а также связей Si-C в кремнийорганических соединениях. Однако в чистом виде эти ферменты не выделены. В клетках бактерий кремний конкурирует с фосфором. Фосфор может постепенно замещаться кремнием. В растительных тканях Si входит в состав полиуронидов — пектинов, в которых он выполняет роль «сшивающего» элемента [4], что делает его важным элементом в процессах питания и роста растений.

Таким образом, как показано нами и отмечено в литературе, микроорганизмы могут способствовать связыванию элементов в почве, как токсиантов, так и биогенных элементов, образуя слабо подвижные органические соединения с метал-

**Таблица 5.** Соотношение коэффициентов бионакопления кремния в растениях пшеницы и овса, выращенных на окультуренной и на техногенно-загрязненной почвах ( $K_{6\ 500\text{ м}}$  :  $K_{6\ 10\text{ м}}$ )

Вариант	Органы растения	$K_{6\ 500\text{ м}}$ : $K_{6\ 10\text{ м}}$ , пшеница	$K_{6\ 500\text{ м}}$ : $K_{6\ 10\text{ м}}$ , овес
Контроль, H <sub>2</sub> O	Стебель, лист	34.2	14.4
	Корень	32.9	13.4
Опыт, <i>B. mucilaginosus</i>	Стебель, лист	6.7	8.1
	Корень	7.9	5.6

лами [22] или металлоорганические комплексы в виде хелатов [23] и внутрикомплексных соединений, тем самым уменьшая или увеличивая подвижность элементов, что определяется свойствами и концентрацией металлов [21]. Причем в природных условиях (без экзогенного внесения микробного инокулянта в почву) немаловажную роль биосорбентов играют, вероятно, аборигенные виды почвенных бактерий, помогая растению регулировать процессы транслокации металлов в системе почва–растение–микроорганизмы. Инокуляция почвы специально отобранными штаммами микроорганизмов, используемых в бактериальных препаратах как биоудобрения, способствует улучшению этих процессов, восстанавливая природное равновесие в условиях техногенно-нарушенных почв.

Итак, изученное влияние бактерий *B. mucilaginosus* var. *siliceus* на показатели роста зерновых культур и транслокацию кремния на техногенно-загрязненных ТМ почвах позволяет предложить их для дальнейшего исследования и применения в агропроизводстве на урбаноземах, поскольку данный штамм не только продуцирует активные метаболиты, включая фитогормоны, благоприятно влияя на почвенную микрофлору и растения [24], но и обладает геохимической активностью в мобилизации резервов биогенных элементов неорганической природы [13, 17], в частности, кремния. Кремний, в свою очередь, может способствовать повышению устойчивости растений к различным негативным воздействиям, биотической и абиотической природы, в том числе, таким как техногенное загрязнение почв.

## ВЫВОДЫ

1. Показано, что в техногенно загрязненной тяжелыми металлами (ТМ) почве кремния накапливалось значительно больше, чем в окультуренной почве, как в ризосфере пшеницы, так и овса.

2. Техногенное загрязнение негативно влияло на растения, замедляя их ростовые процессы и существенно снижая содержание биогенного элемента кремния как в надземных органах, так и в корнях растений, очевидно, за счет буферности

почвы и связывания элемента при высокой концентрации его в почве.

3. Силикатные ризосферные бактерии *B. mucilaginosus* var. *siliceus* приводили к стабилизации ростовых процессов, повышая транслокацию кремния в ткани злаковых растений, что вероятно, усиливало их адаптогенные свойства, за счет укрепления клеточных стенок стеблей, листьев и корней. При этом эти бактерии защищали растение и от избытка ТМ в условиях загрязнения, связывая их в почве.

4. Коэффициенты бионакопления кремния исследованных злаковых культур были значительно снижены в условиях техногенно-загрязненной почвы и более существенно – пшеницы, чем овса.

5. Инокуляция кремнебактериями почв способствовала аккумуляции кремния в растениях пшеницы в 2 раза интенсивнее, чем овса. Это свидетельствовало о том, что пшеница более восприимчива как к негативному воздействию техногенного загрязнения, так и к позитивному влиянию силикатных ризобактерий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронков М.Г., Зелчан Г.И., Лукевиц Э.Я. Кремний и жизнь: биохимия, фармакология и токсикология соединений кремния. Рига: Зинатне, 1978. 588 с.
2. Воронков М.Г., Кузнецов И.Г. Кремний в живой природе. Новосибирск: Наука, СО, 1984. 154 с.
3. Воронков М.Г., Барышук В.П. Силатраны в медицине и сельском хозяйстве / Под ред. Толстикова Г.А. Новосибирск: СО РАН, 2005. 257 с.
4. Колесников М.П. Формы кремния в растениях // Усп. биол. химии. 2001. Т. 41. С. 301–332.
5. Самсонова Н.Е. Кремний в почве и растениях // Агрохимия. 2005. № 6. С. 76–86.
6. Матыченков В.В., Кособрюхов А.А., Шабнова Н.И., Бочарникова Е.А. Кремниевые удобрения как фактор повышения засухоустойчивости растений // Агрохимия. 2007. № 5. С. 63–67.
7. Мишустин Е.Н., Смирнова Г.А., Лохмачева Р.А. Разрушение силикатов микроорганизмами и использование “силикатных” бактерий как бактериальных удобрительных препаратов // Изв. СССР. Сер. биол. 1981. № 5. С. 698–708.

8. Макарова Л.Е., Боровский Г.Б., Булатова А.М., Соколова М.Г., Воронков М.Г., Мирскова А.Н. Влияние кремнийорганических производных триэтанол-амина на рост корней проростков однодольных и двудольных растений // *Агрохимия*. 2006. Т. № 10. С. 1–5.
9. Матыченков В.В. Роль подвижных соединений кремния в растениях и системе почва–растение: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Пушино, 2008. 34 с.
10. Ермолаев А.А. Кремний в сельском хозяйстве // *Химия в сел. хоз-ве*. 1987. № 6. С. 45–47.
11. Матыченков В.В., Кособрюхов А.А., Шабнова Н.И., Бочарникова Е.А. Реакция растений на кремниевые удобрения при засолении почвы // *Агрохимия*. 2005. № 10. С. 59–63.
12. Бочарникова Е.А., Матыченков В.В. Влияние активного кремния на подвижность кадмия в системе почва–растение // *Тр. 2-й Международ. конф. “Современные проблемы загрязнения почв”*. М., 2007. Т. 1. С. 62–65.
13. Вайшля О.Б., Ведерникова А.А., Бондаренко А.П. Микробиологические аспекты гипергенеза. Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. 288 с.
14. Соколова М.Г., Акимова Г.П., Хуснидинов Ш.К. Эффективность применения ассоциативных бактерий биопрепаратов на различных овощных культурах // *Агрохимия*. 2009. № 7. С. 54–59.
15. Sokolova M., Akimova G., Vaishlya O., Vedernikova A. Physiological research of efficiency of biologically safe bacterial fertilizers // *J. Manufactur. Technol. Manag.* 2010. V. 21. Iss. 8. P. 956–970.
16. Белимов А.А., Тихонович И.А. Микробиологические аспекты устойчивости и аккумуляции тяжелых металлов у растений (обзор) // *Сел.-хоз. биол.* 2011. № 3. С. 10–15.
17. Белоголова Г.А., Соколова М.Г., Гордеева О.Н. Миграция и биодоступность тяжелых металлов, мышьяка и фосфора под влиянием ризосферных бактерий в техногенных экосистемах // *Агрохимия*. 2013. № 6. С. 83–92.
18. Соколова М.Г., Белоголова Г.А., Акимова Г.П. Влияние ризосферных бактерий на рост растений и накопление ими тяжелых металлов на техногенно загрязненных почвах // *Агрохимия*. 2014. № 2. С. 73–80.
19. Белоголова Г.А., Гордеева О.Н., Коваль П.В., Джао К.Х., Гао Г.Л. Закономерности распределения и формы нахождения тяжелых металлов в техногенно-трансформированных черноземах Южного Приангарья и Северо-Восточного Китая // *Почвоведение*. 2009. № 4. С. 1–12.
20. Гордеева О.Н., Белоголова Г.А., Гребенщикова В.И. Распределение и миграция тяжелых металлов и мышьяка в системе “почва–растение” в условиях г. Свирска (Южное Прибайкалье) // *Пробл. регион. экол.* 2010. № 3. С. 108–113.
21. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
22. Переломов Л.В., Переломова И.В., Пинский Д.Л. Молекулярные механизмы взаимодействия между микроэлементами и микроорганизмами в биосферных системах (биосорбция и биоаккумуляция) // *Агрохимия*. 2013. № 3. С. 80–94.
23. Belogolova G.A., Sokolova M.G., Gordeeva O.N., Vaishlya O.B. Speciation of arsenic and its accumulation by plants from rhizosphere soils under the influence of *Azotobacter* and *Bacillus* bacteria // *J. Geochem. Explor.* 2015. № 149. С. 52–58.
24. Соколова М.Г., Акимова Г.П., Вайшля О.Б. Влияние на растения фитогормонов, синтезируемых ризосферными бактериями // *Прикл. биохим. и микробиол.* 2011. Т. 47. № 3. С. 302–307.

## The Role of Silicate Rhizobacteria in Silicon Biosorption under Polyelement Soil Contamination in the System Soil–Plant

M. G. Sokolova<sup>a, #</sup>, G. A. Belogolova<sup>b, ###</sup>, G. P. Akimova<sup>a</sup>, and O. B. Vaishlya<sup>a, ###</sup>

<sup>a</sup> Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry SB RAS  
ul. Lermontova 132, Irkutsk 664033, Russia

<sup>b</sup> Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS  
ul. Favorsky 1a, Irkutsk 664033, Russia

<sup>c</sup> National Research Tomsk State University  
prosp. Lenina 36, Tomsk 634050, Russia

<sup>#</sup>E-mail: SokolovaMG@sifibr.irk.ru

<sup>##</sup>E-mail: gabel@igc.irk.ru

<sup>###</sup>E-mail: planta@mail.tomsknet.ru

It was established that the morphogenesis in the investigated cereals and migration of the biophilic element silicon was defined by the level of the technogenic load on the soil as well as by rhizosphere bacteria effect. On the soils polluted with heavy metals considerable inhibition of the crop growth processes was detected in comparison with crops grown on cultivated soils. Inoculation with silicate bacteria *Bacillus mucilaginosus* promoted cereals growth and an increase of the silicon content in crops for all treatments of the experiment. It was suggested that bacterial treatment contributed to a significant strengthening of the stem and leaves of cereals due to silicon accumulation in plant tissue which could increase the resistance of cereals to lodging and various harmful external effects.

*Key words:* silicate rhizobacteria, silicon, biosorption, soil-plant system, polyelement soil contamination.