

# РОЛЬ РИЗОСФЕРНЫХ БАКТЕРИЙ В БИОГЕОХИМИЧЕСКОЙ МИГРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ, МЫШЬЯКА И БИОФИЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТЕХНОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

**Белоголова<sup>1</sup> Г. А., Гордеева<sup>1</sup> О. Н., Соколова<sup>2</sup> М. Г.**

<sup>1</sup> *Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, e-mail: gabel@igc.irk.ru*

<sup>2</sup> *Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, Иркутск, e-mail: SokolovaMG@sifibr.irk.ru*

В настоящее время активно развиваются новые биотехнологии в растениеводстве с применением микроорганизмов. Это направление ориентировано на сокращение применения азотных, фосфорных удобрений и отказ от опасных для здоровья человека пестицидов [Минеев, 1990]. В то же время, существуют данные о том, что инокуляция растений ризосферными бактериями может увеличивать риск аккумуляции тяжелых металлов в растениях, выращиваемых на загрязненных техногенных почвах [Khan, 2005]. В этом плане проблема мало изучена. Целью наших исследований явилось изучение особенностей поведения As, Cd, Pb и элемента питания растений фосфора в системе «почва – растение» на техногенных почвах при внесении живых почвенных бактерий в составе биопрепаратов азотобактерина, фосфобактерина и кремнебактерина.

## **Объекты и методы исследования**

Объектами исследования являлись почвы и выращенные на них растения (овес, горох, салат, редис), для которых изучены закономерности распределения As, тяжелых металлов Cd, Pb и биофильного элемента питания фосфора в зависимости от влияния на них ризосферных бактерий *Azotobacter* и *Bacillus*, входящих в состав биопрепаратов азотобактерина, фосфобактерина и кремнебактерина. Биопрепараты являются экологически чистыми, нетоксичными, безопасными для человека и животных стимуляторами роста растений [Вайшла и др., 2006, 2007; Соколова и др., 2009]. Разработаны они в Томском государственном университете и предложены для апробации в агроклиматических условиях Южного Прибайкалья на базе Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН.

Выращивание растений проведено в фитотроне на почвах, отобранных из техногенной зоны г. Свирска, расположенном на берегу р. Ангары (Южное Прибайкалье). Почвы были взяты на различном удалении от основного источника загрязнения, бывшего Ангарского металлургического завода (АМЗ) по производству мышьяка, расположенного в черте города. Для производства мышьяка в военных целях использовали руду Дарасунского золоторудного месторождения, в состав которой входило большое количество разнообразных микроэлементов, большинство из которых являются элементами-токсикантами для живых организмов. Завод был заброшен с 1949 года и оставался основным источником загрязнения окружающей среды.

По результатам эколого-геохимических исследований, проведенных ранее в этом городе, были выявлены участки интенсивного загрязнения мышьяком и тяжелыми металлами различных природных объектов (почва, растения, животные и биосубстраты человека) в концентрациях, значительно превышающих санитарные нормы [Белоголова и др., 2009; Гордеева и др., 2010]. Загрязнение почв распространено не только на территории бывшего Ангарского завода по производству мышьяка, но и на большую часть города. В центральной части этой аномалии загрязнение грунтов и почв мышьяком, свинцом и другими тяжелыми металлами во много раз превышает ПДК.

Почвы для модельного эксперимента отобраны из гумусового горизонта «А» на условно фоновом участке 1, расположенном в 15 км от г. Свирска, – из пахотных почв, на участке 2 – из садово-огородных почв (в 500 м от источника загрязнения) и на участках 3, 4 –

в 100 и 10 м от АМЗ. На максимально загрязненном участке 4 гумусовый горизонт сформирован на технозомах, на участке 3 развиты карбонатно-дерновые почвы.

Каждая проба почв разделена на исходную (контроль) и обработанную биопрепаратами (опыт), на которых проведено выращивание растений в одинаковых условиях.

Растения не достигли зрелого состояния, так как на максимально загрязненных техногенных почвах после 35 дней роста они начали высыхать. Для анализа использовали растения, высушенные до воздушносухого состояния. Из почв, на которых выросли растения, проведена экстракция тяжелых металлов, мышьяка и фосфора с помощью этилендиаминтетраацетата (ЭДТА).

Для определения массовой доли As, Pb, Cd в пробах использовали метод атомной абсорбции, для анализа растений – метод ISP-MS. Определение фосфора выполнено методом спектрофотометрии.

### Результаты исследований

Результаты распределения тяжелых металлов (Pb, Cd), мышьяка и фосфора в почвах по валовым содержаниям и в вытяжке ЭДТА показаны в табл. 1.

Таблица 1.

Распределение содержаний As, Pb, Cd в исходной почве (контроль) и с добавлением бактерий (опыт) в зоне влияния АМЗ г. Свирска и на фоновом участке, мг/кг.

Характеристика проб	As		Pb		Cd		P
	Вал	ЭДТА	Вал	ЭДТА	Вал	ЭДТА	ЭДТА
Фоновый участок 1							
Контроль	30	2	23	<b>1.4</b>	0.25	0.10	<b>2190</b>
Опыт	30	2	18	1.2	0.3	<b>0.17</b>	2027
500 м Участок 2							
Контроль	100	<b>46</b>	135	<b>33.6</b>	0.4	0.19	<b>734</b>
Опыт	70	29.4	154	25.9	0.4	<b>0.22</b>	495
100 м Участок 3							
Контроль	213	<b>200</b>	49	<b>5.8</b>	0.36	0.11	<b>2300</b>
Опыт	115	68.6	33	3.6	0.28	<b>0.12</b>	1988
10 м Участок 4							
Контроль	3100	246	1260	74.9	5.1	1.7	3047
Опыт	2640	<b>443</b>	2100	<b>115.5</b>	4.7	<b>3.4</b>	<b>3234</b>
ОДК	10	–	32-130	–	0.5-2.0	–	–

*Примечание:* расстояние от отвалов АМЗ 10, 100, 500 м. Жирным шрифтом выделено повышенное содержание элементов по фракции ЭДТА при сопоставлении контрольного и опытного эксперимента на одном участке. ОДК – ориентировочно допустимая концентрация [Контроль ..., 1998].

Максимально высокие валовые содержания As, Cd, Pb установлены в техногенных почвах вблизи отвалов мышьяка в десятки и сотни раз превышающие ОДК. На удалении от источника загрязнения содержания их снижаются. Повышенные концентрации элементов по фракции ЭДТА могут указывать на возможность образования органических хелатных форм, большая часть из которых может быть доступна для аккумуляции в растениях и микроорганизмах. В результате микроорганизмы могут способствовать образованию трудно растворимых слабо подвижных органических фракций с тяжелыми металлами.

По результатам вытяжки ЭДТА отмечено влияние ризобактерий на величину концентрации тяжелых металлов и мышьяка в почвах. Содержания кадмия имеют тенденцию незначительно увеличиваться в хелатной фракции ЭДТА почв, обработанных бактериальными препаратами на всех участках, но максимальное значение кадмия в этом случае установлено в опыте на участке 4 (табл.1). Для остальных элементов – As, Pb и P

отмечается уменьшение содержаний в вытяжках ЭДТА в случае внесения ризобактерий в почву, за исключением максимально загрязненной почвы, отобранной вблизи (10 м) от источника загрязнения, где наблюдается обратная зависимость. На фоновом участке прослеживаются незначительные изменения между контрольным и опытным вариантом. Несмотря на то, что ризобактерии способствуют накоплению хелатных фракций тяжелых металлов и мышьяка в техногенных почвах, отобранных вблизи отвалов, концентрация данных элементов в растениях, выращенных на этих почвах, резко уменьшается в случае бактериализации почвы (табл. 2).

Таблица 2.

Содержание химических элементов в растениях (на сухое вещество, мг/кг),  
выращенных на техногенных и фоновых почвах

Растения	10 м от отвалов, участок 4				Фоновый участок 1			
	As	Pb	Cd	P%	As	Pb	Cd	P %
	контроль				контроль			
Салат	101	51.1	<b>9.3</b>	0.97	0.447	0.190	0.35	0.9
Редис	<b>79.7</b>	<b>25.3</b>	<b>3.01</b>	0.95	0.170	0.280	0.33	<b>1.6</b>
Горох	<b>18.7</b>	<b>5.04</b>	<b>1.11</b>	1.4	0.110	0.016	0.31	1.4
Горох корень	<b>110</b>	<b>27.7</b>	<b>6.18</b>	0.89	0.250	0.020	0.22	0.7
Овес	<b>19.2</b>	0.82	0.85	<b>2.2</b>	0.079	0.029	0.13	1.5
Овес корень	<b>120</b>	<b>40.6</b>	<b>1.44</b>	0.6	0.082	0.046	0.15	<b>1.0</b>
	опыт				опыт			
Салат	<b>109</b>	<b>62.1</b>	2.98	<b>1.0</b>	<b>0.740</b>	<b>0.261</b>	<b>0.38</b>	<b>1.4</b>
Редис	7.7	1.89	0.25	<b>1.8</b>	<b>0.830</b>	0.246	<b>0.51</b>	1.3
Горох	11.8	2.90	0.86	1.4	<b>1.12</b>	<b>0.067</b>	<b>0.61</b>	<b>1.5</b>
Горох корень	2.28	0.96	0.15	<b>1.0</b>	<b>0.78</b>	<b>0.052</b>	<b>0.67</b>	<b>1.5</b>
Овес	14.8	<b>1.71</b>	0.88	1.7	<b>0.67</b>	<b>0.049</b>	<b>0.23</b>	<b>1.8</b>
Овес корень	30.7	8.26	0.85	0.6	<b>0.7</b>	0.047	<b>0.23</b>	0.7

Примечание: контроль – исходная почва; опыт – почва с добавлением бактерий. Жирным шрифтом выделено повышенное содержание при сопоставлении контрольного и опытного экспериментов.

Это может указывать на способность ризобактерий переводить подвижные соединения тяжелых металлов и мышьяка в связанные и труднодоступные для растений формы в случае сильно загрязненных почв. Не случайно в опыте вытяжки ЭДТА из почв участка 4 установлены максимальные содержания тяжелых металлов, которые, по-видимому, под влиянием ризосферных бактерий ограничивают подвижность и аккумуляцию тяжелых металлов и мышьяка в растениях за счет их адсорбции почвенными бактериями. В результате чего резко снижается аккумуляция элементов-токсикантов в растениях под влиянием ризобактерий (табл. 1, 2).

На фоновых почвах с низким содержанием тяжелых металлов и мышьяка получена противоположная закономерность. Содержания As, Cd, Pb в растениях увеличены в опытном эксперименте, но величина основных элементов-токсикантов в растениях и почвах здесь на порядок ниже относительно техногенных (табл. 2), что подтверждалось и ранее [Белоголова и др., 2011]. Эти факты указывают на то, что почвенные бактерии могут значительно влиять на миграцию химических элементов в системе «почва-растение». Известно, чем ниже содержания тяжелых металлов, тем выше энергия их взаимодействия с органическими комплексами [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989]. В нашем эксперименте наблюдается такая же закономерность. В диапазоне низких содержаний тяжелых металлов на почвах фонового участка ризобактерии способствуют накоплению тяжелых металлов и мышьяка в виде подвижных хелатных форм, способных легко поступать в растения. В результате чего, в опытном эксперименте наблюдается увеличение концентрации тяжелых металлов и мышьяка в растениях, но только в диапазоне низких содержаний. При высоких содержаниях

тяжелых металлов в почве бактерии обладают способностью блокировать этот процесс (табл. 2).

В отличие от тяжелых металлов и мышьяка, у фосфора сохраняется общая тенденция накопления его в растениях под влиянием ризосферных бактерий в условиях различного загрязнения почв, где основную роль, по-видимому, играет фосфобактерин. Снижение концентраций фосфора в растениях в некоторых случаях может быть обусловлено межэлементным его взаимодействием с повышенными содержаниями тяжелых металлов и мышьяка в растениях.

Иммобилизация тяжелых металлов и мышьяка в растениях зависит от их вида и органов. Максимальное их накопление прослеживается в салате и корневых частях растений.

Максимальная подвижность в системе «почва–растение» установлена для кадмия, которая еще больше может увеличиваться под влиянием ризосферных бактерий. Минимальной мобильностью и биодоступностью в этой системе обладает свинец, на что указывают их коэффициенты биологического поглощения.

Проведенные исследования позволили установить некоторые принципы влияния ризосферных бактерий на мобилизацию и иммобилизацию тяжелых металлов и мышьяка в системе «почва–растение» в условиях техногенеза и выделить основные факторы, влияющие на их миграцию. Главное, установлена способность изученной группы ризосферных бактерий к биосорбции тяжелых металлов и мышьяка из загрязненных ими почв, что может иметь большое практическое значение при использовании новых биотехнологий в растениеводстве и для фиторемердиации почв.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Томского госуниверситета О. Б. Вайшля и А.А. Ведерниковой за предоставленную возможность исследования биопрепаратов.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 12-05-00-257.*

### Литература

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.

Белоголова Г.А., Соколова М.Г., Пройдакова О.А. Влияние почвенных бактерий на поведение химических элементов в системе «почва-растение» // Агрехимия. 2011. №9. С. 89-97.

Вайшля О.Б., Ведерникова А.А., Бондаренко А.П. Микробиологические аспекты гипергенеза. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. – 288 с.

Вайшля О.Б., Трифонова Н.А., Ведерникова А.А. Мобилизация кремния и фосфора бактериями биопрепаратов «Кремнебактерин» и «Фосфобактерин» // Матер. XXI межд. научн. конф. Томск, 2006. Т. II. С. 349-351.

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) // Проблемы региональной экологии. 2010. №3. С. 108-113.

Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. – М.: Мир, 1989. – 439 с.

Контроль химических и биологических параметров окружающей среды / под ред. Исаева Л. К. – СПб: эколого-аналитический информационный центр «Союз», 1998. – 896 с.

Минеев В. Г. Химизация земледелия и природная среда. – М.: Агропромиздат, 1990. 287 с.

Соколова М.Г., Акимова Г.П., Хуснидинов Ш.К. Изучение эффективности ассоциативных бактерий биопрепаратов на различных овощных культурах // Агрехимия, 2009. № 7. С. 54-59.

Khan A.G. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation // J. Trace Elem. Med. Biol. 2005. V. 18. P. 355-364.