

УДК 579.66+58.04+58.02

Л. В. Литвиненко, А. Т. Тищенко

Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, Пермь, Россия

## ВЛИЯНИЕ *RHODOCOCCUS*-БИОСУРФАКТАНТОВ НА ФИТОТОКСИЧНОСТЬ ИОНОВ СВИНЦА

Изучено влияние различных концентраций ионов свинца на прорастание семян сельскохозяйственных культур растений: вики полевой, горчицы белой и овса посевного в присутствии *Rhodococcus*-биосурфактантов. Выявлена прямая зависимость между присутствием *Rhodococcus*-биосурфактантов и повышением всхожести семян, роста корней и побегов проростков растений-аккумуляторов тяжелых металлов.

**Ключевые слова:** *Rhodococcus*-биосурфактанты; тяжелые металлы; вика полевая; горчица белая; овес посевной.

L. V. Litvinenko, A. V. Tishchenko

Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms of the Ural Branch RAS, Perm, Russian Federation

## EFFECTS OF *RHODOCOCCUS*-BIOSURFACTANTS ON THE LEAD ION PHYTOXICITY

The effects of different concentrations of lead ions on the seed germination of agricultural crops *Vicia sativa* L., *Sinapis alba* L. and *Avena sativa* L. in the presence of *Rhodococcus*-biosurfactants were studied. There was a direct relation between the presence of *Rhodococcus*-biosurfactants and the increase in seed germination, root and shoot growth of seedlings of plants that accumulate heavy metals.

**Key words:** *Rhodococcus*-biosurfactants; heavy metals; *Avena sativa* L.; *Sinapis alba* L.; *Vicia sativa* L.

Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами (ТМ) является одним из самых распространенных и экологически опасных для живых организмов и их сообществ. Основными источниками загрязнения ТМ являются предприятия, которые специализируются на добыче и переработке руды металлов, нефтепродуктов, а также синтезе химических веществ. Металлы, в отличие от органических соединений, не подвергаются процессам биodeградации; они перераспределяются между компонентами природной среды, оседают в почве или грунтах, и, в конечном итоге, по трофическим цепям передаются высшим животным и человеку.

Многие виды растений способны накапливать тяжелые металлы, причем содержание ионов ТМ в органах растений может в десятки и даже сотни раз превышать их содержание в окружающей среде. Способность растений накапливать ТМ реализуется на разных уровнях организации: клеточном, тканевом и органном, что связано, прежде всего, со способностью растений накапливать металлы в клеточных оболочках и вакуолях, а также с существованием барьерных тканей, ограничивающих передвижение ряда тяжелых металлов.

По способности к аккумуляции тяжелых металлов выделяют три группы растений: (1) индифферентные растения, которые не накапливают ТМ в органах; (2) растения-исключатели, которые обладают способностью поглощать ТМ корневой системой, но не передают их в побеги; (3) растения-аккумуляторы, которые в больших количествах накапливают ТМ в тканях надземных органов [Титов и др., 2007; Иванова, Шарф, 2011]. Так, например, свинец подавляет аккумуляцию и передвижение по тканям корневой системы и побегов растений жизненно необходимых ионов  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Mn^{3+}$ ,  $Mn^{4+}$  и  $Zn^{2+}$ , нарушая процессы их связывания с металлохелатирующими соединениями [Линдиман и др., 2010]. Свинец, в отличие от некоторых других металлов при незначительных концентрациях практически не проникает в листья [Яковишина, 2014], вызывая быстрое закрытие устьиц. Таким образом, свинец снижает транспирацию, ограничивает поступление  $CO_2$  в листья и, следовательно, уменьшает интенсивность фотосинтеза, при этом барьером для ионов  $Pb^{2+}$  выступают эпидерма и кутикула. В то же время в условиях сильного загрязнения через листовые пластинки в ткани растения может попадать до

50% свинца, содержащегося в атмосферном воздухе [Пугаев, 2013].

Существующие способы очистки почвы от ТМ базируются в основном на использовании физико-химических приемов, которые не обеспечивают полноты удаления ионов ТМ. Более цивилизованные методы предполагают использование биологических способов очистки, таких как биовыщелачивание с помощью сурфактантов биогенного происхождения [Костина, Куюкина, Ившина, 2009], а также методов фиторемедиации [Андреева, Байбеков, Злобина, 2009]. Однако каждый из данных методов по отдельности малоэффективен при очистке почвы. Так, например, методы фиторемедиации при высоком уровне загрязнения почвы ТМ (уровень загрязнения кратностью > 100 ПДК) не используются в связи с гибелью растений [Коротченко, Львова, 2015], тогда как использование исключительно биосурфактантов также неэффективно из-за невозможности выведения десорбированных мобилизованных форм тяжелых металлов из почвы [Mulligan, Wang, 2006].

В настоящее время в Индии и Китае активно разрабатываются комбинированные и экологически безопасные технологии очистки почвы от ТМ, основанные на использовании методов фиторемедиации и биосурфактантов.

Цель работы – оценка влияния различных концентраций ионов свинца на прорастание семян вики полевой, горчицы белой и овса посевного в присутствии *Rhodococcus*-биосурфактантов.

## Материалы и методы

В сравнительных исследованиях изучали влияние *Rhodococcus*-биосурфактантов (в концентрациях 2.0; 4.0 и 8.0 г/л воды) на фитотоксичность нитрата свинца ( $Pb(NO_3)_2$ ) в отношении всхожести семян растений: овса посевного (*Avena sativa* L.), горчицы белой (*Sinapis alba* L.) и вики полевой (*Vicia sativa* L.). Уровень фитотоксичности определяли в соответствии со стандартными Методическими рекомендациями МР 2.1.7.2297-07 «Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности (Фитотест)» (МР 2.1.7.2297-07, 2007). Условия проращивания: подсветка белыми люминесцентными лампами, спектр которых максимально приближен к дневному свету; температура 23–25°C; pH = 6.3–6.5. Как видно из табл. 1, нитрат свинца добавляли из расчета кратности уровня предельно-допустимой концентрации (ПДК) ионов  $Pb^{2+}$  с учетом фона по Кларк (ГН 2.1.7.2041-06, 2006). В качестве контроля использовали дистиллированную воду.

В работе использовали штамм актинобактерий *Rhodococcus ruber* ИЭГМ 231, хранящийся в Региональной профилированной коллекции алканотрофных микроорганизмов (ИЭГМ, No. 768 во Всемирной федерации коллекций культур;

www.iegmc.ru; реестровый номер УНУ www.ckrf.ru/usu/73559). Бактериальную культуру выращивали в среде RS (*Rhodococcus* Surfactant) на орбитальном шейкере в течение 7 сут. (160 об/мин, 28°C). Состав среды RS (г/л):  $Na_2HPO_4$  – 2.0;  $KH_2PO_4$  – 2.0;  $KNO_3$  – 1.0;  $(NH_4)_2SO_4$  – 2.0; NaCl – 1.0;  $MgSO_4 \times 7H_2O$  – 0.2;  $CaCl_2 \times 2H_2O$  – 0.02;  $FeCl_3 \times 7H_2O$  – 0.01. В качестве единственного источника углерода и энергии использовали *n*-додекан ( $C_{12}$ ), либо *n*-гексадекан ( $C_{16}$ ) в концентрации 3 об.%. В качестве источника витаминов и фактора роста добавляли раствор микроэлементов по Пфеннигу – 1.0 мл/л и 10%-ный дрожжевой экстракт – 1.0 мл/л [Ivshina et al., 1998]. Неочищенные *Rhodococcus*-биосурфактантные комплексы гликолипидной природы, продуцируемые родококками, получали методом [Куюкина et al., 2001]. В тексте статьи для условного обозначения *Rhodococcus*-биосурфактантов, продуцируемых родококками в жидкой минеральной среде с *n*-додеканом, нами использован термин *Rhodococcus*-биосурфактанты  $C_{12}$ ; для *Rhodococcus*-биосурфактантов, продуцируемых родококками в среде с *n*-гексадеканом, – *Rhodococcus*-биосурфактанты  $C_{16}$ .

Таблица 1

Соотношение ПДК с концентрациями ионов свинца

Уровень ПДК	Концентрация (мг/кг почвы) $Pb^{2+}$ с учетом фона по Кларк
1 ПДК	32.0
10 ПДК	320.0
50 ПДК	1600.0
100 ПДК	8000.0
200 ПДК	16000.0

Статистическую обработку результатов проводили стандартными методами с вычислением среднего арифметического, стандартной ошибки, среднеквадратичного отклонения и доверительного интервала с помощью пакета компьютерных программ Microsoft Excel 2007 (Microsoft Inc., 2007). Все эксперименты проводили в 3-кратной повторности.

## Результаты и их обсуждение

Исследовано влияние спектра концентраций нитрата свинца на устойчивость и прорастание семян растений-фитоаккумуляторов в присутствии водных растворов *Rhodococcus*-биосурфактантов, продуцируемых при выращивании родококков в среде с *n*-додеканом и *n*-гексадеканом. В результате проведенных исследований установлено, что по степени устойчивости семян к ионам  $Pb^{2+}$  изученные растения можно распределить в ряд: *Avena sativa* L. > *Sinapis alba* L. > *Vicia sativa* L.

Результаты по исследованию влияния ионов  $Pb^{2+}$  на длину побегов и корневой системы овса, горчицы и вики в присутствии *Rhodococcus*-бисур-

фактантов  $C_{12}$  представлены в табл. 2. Наиболее интенсивное прорастание корневой системы и побегов выявлены у овса посевного. Семена данного растения прорастали при всех используемых в ра-

боте концентрациях ТМ, и в подавляющем большинстве случаев энергия их прорастания была выше, чем у семян горчицы и вики.

Таблица 2

**Влияние свинца на всхожесть побегов и корневой системы (мм) овса, горчицы и вики в присутствии *Rhodococcus*-биосурфактантов  $C_{12}$**

Варианты эксперимента	Овёс посевной		Горчица белая		Вика полевая	
	Длина побега	Длина корня	Длина побега	Длина корня	Длина побега	Длина корня
Контроль	49.1±8.3	40.8±5.2	25.2±9.9	22.5±4.8	27.3±6.0	19.3±9.8
Pb <sup>2+</sup> 1 ПДК	44.3±24.5	21.2±10.3	20.7±5.0	14.6±6.8	23.2±4.6	–
Pb <sup>2+</sup> 10 ПДК	29.4±8.0	20.9±9.9	19.7±6.3	9.2±3.9	11.1±3.9	–
Pb <sup>2+</sup> 50 ПДК	28.0±9.1	10.2±3.2	13.7±8.5	–	11.4±4.6	–
Pb <sup>2+</sup> 100 ПДК	14.3±4.4	5.7±2.7	–	–	11.3±3.8	–
Pb <sup>2+</sup> 200 ПДК	4.3±2.3	–	–	–	–	–
Б/нт 2 г/л	55.7±14.4	48.4±9.5	32.2±8.7	31.7±3.0	30.8±2.6	18.2±3.0
Б/нт 4 г/л	67.4±5.7	53.0±6.1	39.7±6.7	37.0±3.8	32.5±1.8	19.3±3.4
Б/нт 8 г/л	45.1±5.2	35.1±3.2	24.6±5.0	26.2±8.0	27.0±2.0	12.3±3.4
1 ПДК / 2 г/л	56.5±7.7	46.5±3.3	29.5±3.9	28.3±5.8	29.0±6.2	8.3±1.4
1 ПДК / 4 г/л	64.8±6.6	51.8±7.8	37.1±2.5	32.8±5.7	31.3±2.4	9.3±2.1
1 ПДК / 8 г/л	44.6±4.1	41.8±3.5	27.7±6.1	23.1±3.0	26.2±7.5	6.1±0.4
10 ПДК / 2 г/л	40.9±7.9	23.9±4.2	20.9±4.9	14.1±9.1	20.7±4.1	2.1±0.4
10 ПДК / 4 г/л	48.9±6.6	24.3±2.6	22.0±6.8	16.7±2.1	20.0±3.6	8.1±0.6
10 ПДК / 8 г/л	53.8±9.0	25.1±4.2	19.7±5.0	14.3±3.4	19.0±4.2	–
50 ПДК / 2 г/л	38.3±3.6	18.2±4.6	20.6±5.5	13.5±7.8	19.0±1.6	–
50 ПДК / 4 г/л	46.0±4.1	21.7±3.7	20.0±3.1	13.5±2.1	22.0±1.4	3.1±0.6
50 ПДК / 8 г/л	33.4±2.2	15.0±2.8	12.2±7.0	3.5±0.1	20.3±2.7	–
100 ПДК / 2 г/л	24.7±5.7	7.9±4.0	–	–	16.3±4.3	–
100 ПДК / 4 г/л	28.0±6.6	9.2±4.2	8.2±1.4	–	18.0±1.0	–
100 ПДК / 8 г/л	31.6±5.0	6.5±2.1	–	–	14.0±3.7	–
200 ПДК / 2 г/л	29.2±3.4	8.8±4.8	–	–	12.8±4.2	–
200 ПДК / 4 г/л	21.2±4.4	7.3±3.3	–	–	15.6±3.8	–
200 ПДК / 8 г/л	25.7±3.3	7.3±4.2	–	–	13.5±2.8	–

Примечание. В разделе «Варианты эксперимента» представлены используемые в работе растворы в виде концентрации ионов свинца / *Rhodococcus*-биосурфактантов (ПДК / г/л).

Следует отметить полное ингибирование прорастания корневой системы у вики полевой в присутствии ионов свинца. Данная закономерность наблюдалось при всех используемых в работе концентрациях ТМ. Прорастание корневой системы семян вики полевой выявлено только в серии контрольных экспериментов и в присутствии препарата *Rhodococcus*-биосурфактантов  $C_{12}$  в концентрации 2.0 и 4.0 г/л. Подавление прорастания семян горчицы отмечено нами при использовании нитрата свинца в концентрациях 100 и 200 ПДК.

Аналогичная тенденция наблюдалась нами при проведении экспериментов по изучению влияния ионов Pb<sup>2+</sup> на длину побегов и корневой системы овса, горчицы и вики в присутствии препарата *Rhodococcus*-биосурфактантов  $C_{16}$ . В табл. 3 приведены результаты измерений длины побегов и корневой системы растений овса, горчицы и вики, при прорастании их семян в водных растворах соли ТМ и препарата *Rhodococcus*-биосурфактантов, полученного при культивировании родококков на *n*-гексадекане.

Таблица 3

**Влияние свинца на всхожесть побегов и корневой системы (мм) овса, горчицы и вики в присутствии *Rhodococcus*-биосурфактантов  $C_{16}$**

Варианты эксперимента	Овёс посевной		Горчица белая		Вика полевая	
	Длина побега	Длина корня	Длина побега	Длина корня	Длина побега	Длина корня
Б/нт 2 г/л	39.5±26.0	41.8±21.3	30.5±11.1	33.6±26.3	29.2±2.8	–
Б/нт 4 г/л	31.9±19.3	35.3±18.3	27.9±8.7	33.8±20.1	31.8±1.7	–
Б/нт 8 г/л	23.5±7.0	23.9±13.6	20.5±7.4	40.2±29.7	30.8±1.8	–
1 ПДК / 2 г/л	51.2±26.2	52.7±20.3	24.0±10.6	20.4±17.1	34.3±1.5	–
1 ПДК / 4 г/л	47.3±17.7	51.4±16.2	22.5±4.6	28.0±10.9	29.8±2.5	–
1 ПДК / 8 г/л	34.6±18.7	45.5±21.8	20.4±6.2	16.0±11.0	27.4±1.6	–
10 ПДК / 2 г/л	49.6±26.8	23.9±12.6	23.0±8.0	12.0±4.2	27.3±4.1	–

Окончание табл. 3

Варианты эксперимента	Овёс посевной		Горчица белая		Вика полевая	
	Длина побега	Длина корня	Длина побега	Длина корня	Длина побега	Длина корня
10 ПДК / 4 г/л	65.7±25.4	41.6±15.6	21.3±3.7	15.1±6.4	29.6±3.4	–
10 ПДК / 8 г/л	54.3±28.6	23.3±6.8	19.5±6.2	9.3±5.5	26.2±2.1	–
50 ПДК / 2 г/л	43.9±19.2	15.6±5.8	18.7±3.5	4.2±2.1	18.6±2.5	–
50 ПДК / 4 г/л	41.5±20.9	16.3±4.0	16.0±2.4	5.1±1.4	23.3±4.2	–
50 ПДК / 8 г/л	53.8±21.0	13.2±5.2	14.9±2.6	–	21.7±3.3	–
100 ПДК / 2 г/л	31.2±14.2	8.2±3.0	–	–	19.0±2.4	–
100 ПДК / 4 г/л	34.7±15.8	6.7±1.8	–	–	15.2±1.6	–
100 ПДК / 8 г/л	26.6±8.1	7.1±3.6	–	–	18.4±1.4	–
200 ПДК / 2 г/л	12.2±7.6	–	–	–	11.2±0.6	–
200 ПДК / 4 г/л	14.8±8.8	8.3±4.7	–	–	8.6±1.2	–
200 ПДК / 8 г/л	14.9±8.5	3.0±0.7	–	–	–	–

Примечание. В разделе «Варианты эксперимента» представлены используемые в работе растворы в виде концентрации ионов свинца / *Rhodococcus*-биосурфактантов (ПДК / г/л).

Как видно на рис. 1, наиболее высокая степень всхожести (100%) семян овса выявлена в присутствии ионов свинца в концентрации 1 ПДК, самый низкий уровень всхожести семян (64%) отмечен нами в условиях обработки овса посевного раствором ТМ в концентрации 100 ПДК. Можно отметить, что прорастание семян овса в условиях содержания ТМ в концентрациях 10 и 50 ПДК отличаются друг от друга на 2%.

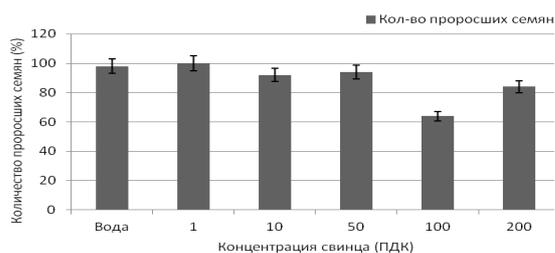


Рис. 1. Всхожесть семян *Avena sativa* в присутствии ионов свинца (ПДК, мг/кг почвы)

Как видно на рис. 2, всхожесть семян овса в растворах с нитратом свинца выше после обработки их препаратом *Rhodococcus*-биосурфактантов,

продуцированных родококками на *n*-гексадекане, по сравнению с обработкой *Rhodococcus*-биосурфактантами C<sub>12</sub>. При добавлении *Rhodococcus*-биосурфактантов C<sub>16</sub> в концентрации 2.0 г/л всхожесть семян овса выше на 26%, тогда как при концентрации препарата биосурфактантов C<sub>16</sub> 4.0 г/л семена овса прорастают в 6.5 раз более интенсивно по сравнению с вариантом эксперимента при обработке семян *Rhodococcus*-биосурфактантами C<sub>12</sub>. Всхожесть семян овса в среднем на 24% выше в присутствии *Rhodococcus*-биосурфактантов (8.0 г/л), продуцируемых родококками на *n*-гексадекане, по сравнению с его всхожестью в присутствии биосурфактантов, продуцируемых на *n*-додекане.

Суммарное количество проросших семян овса в присутствии ионов ТМ и *Rhodococcus*-биосурфактантов, продуцированных родококками на *n*-додекане, выше в 1.2–2.7 раз, по сравнению с вариантами эксперимента с использованием растворов свинца и биосурфактантов, продуцированных в среде с *n*-гексадеканом (рис. 2).

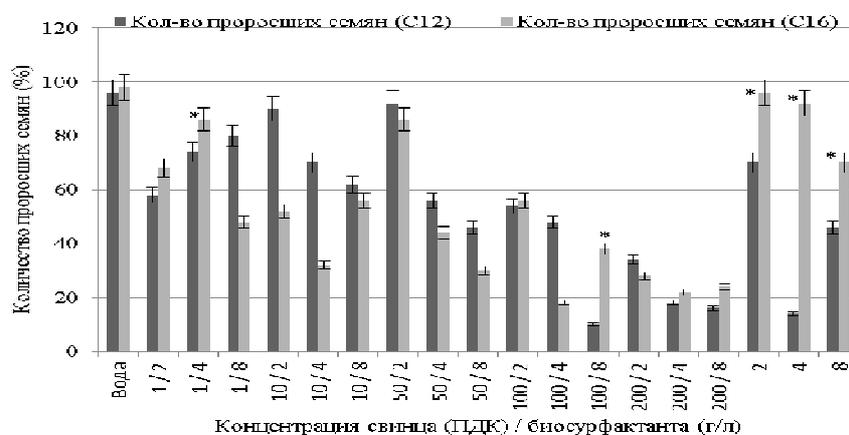


Рис. 2. Всхожесть семян *Avena sativa* в присутствии ионов свинца и биосурфактантов (ПДК, мг/кг почвы / г/л).

\*Статистически достоверно ( $p < 0,05$ ) от *Rhodococcus*-биосурфактантов C<sub>12</sub>; C<sub>12</sub> – *Rhodococcus*-биосурфактанты, продуцируемые на *n*-додекане; C<sub>16</sub> – *Rhodococcus*-биосурфактанты, продуцируемые на *n*-гексадекане

Как видно на рис. 3, наиболее высокий уровень всхожести (60%) семян горчицы выявлен нами при прорастании их в присутствии ионов свинца в концентрации 1 ПДК. Всхожесть семян горчицы в присутствии ионов свинца в концентрациях 10 и 50 ПДК отличается между собой на 2%. При более высоких концентрациях свинца прорастание семян горчицы нами не выявлено.

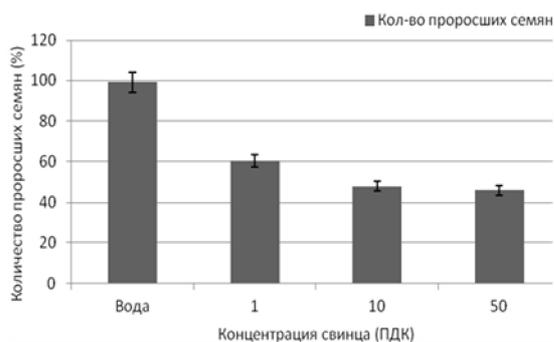


Рис. 3. Всхожесть семян *Sinapis alba* в присутствии ионов свинца (ПДК, мг/кг почвы)

Как видно на рис. 4, количество проросших семян при обработке их *Rhodococcus*-биосурфактантом C<sub>16</sub> выше на 6%, чем *Rhodococcus*-биосурфактантом C<sub>12</sub> при концентрации препаратов 2.0 г/л. Однако при обработке семян горчицы биосурфактантами, продуцированными на *n*-додекане,

всхожесть семян в 1.3–1.5 раз выше, чем на *n*-гексадекане при использовании растворов в концентрации 4.0 и 8.0 г/л. Как видно из рис. 4, всхожесть семян горчицы в 1.5–7.2 раз лучше при обработке их *Rhodococcus*-биосурфактантами C<sub>16</sub>, по сравнению с прорастанием семян после обработки их *Rhodococcus*-биосурфактантами C<sub>12</sub>. При концентрации свинца выше 100 ПДК всхожесть семян горчицы нами не выявлена. Всхожесть семян вики полевой в присутствии нитрата свинца в концентрации 50 ПДК в 1.6 раз более интенсивна, по сравнению с таковой при концентрации ТМ 10 ПДК и в 2.6 раз выше по сравнению с прорастанием семян вики в присутствии ТМ в концентрации 200 ПДК (рис 5).

Как видно на рис. 6, всхожесть семян вики полевой при обработке их препаратом *Rhodococcus*-биосурфактантов C<sub>12</sub> в 1.6–3.0 раза выше по сравнению с всхожестью семян после обработки их растворами *Rhodococcus*-биосурфактантов C<sub>16</sub>. Исключение из данной тенденции составили варианты эксперимента с концентрацией нитрата свинца 10 ПДК. Следует отметить, что в варианте эксперимента с обработкой семян препаратами биосурфактантов в концентрации 4.0 г/л в присутствии ТМ в концентрации 1 ПДК прорастания семян вики нами не выявлено.

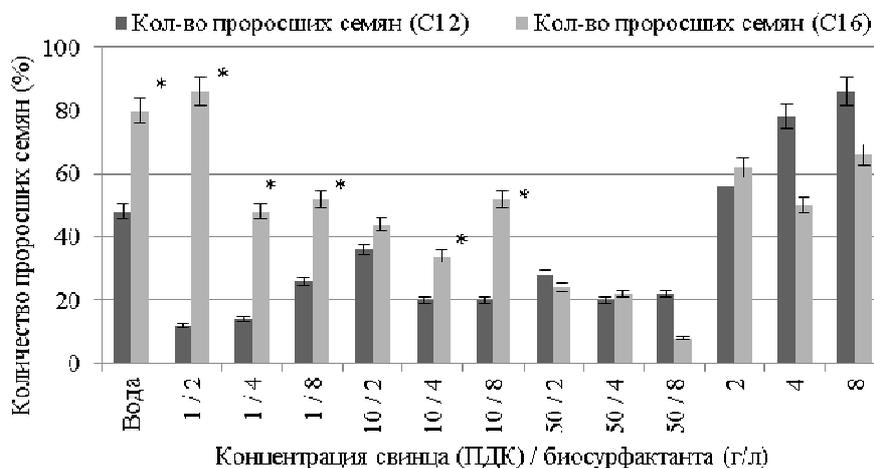
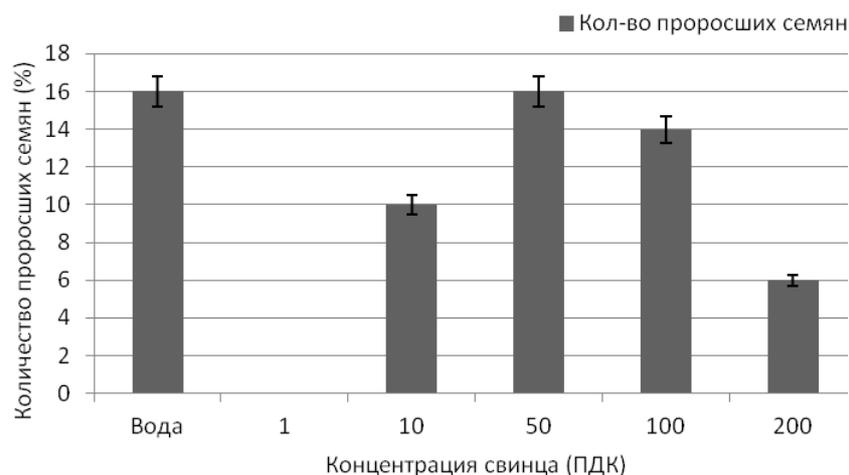
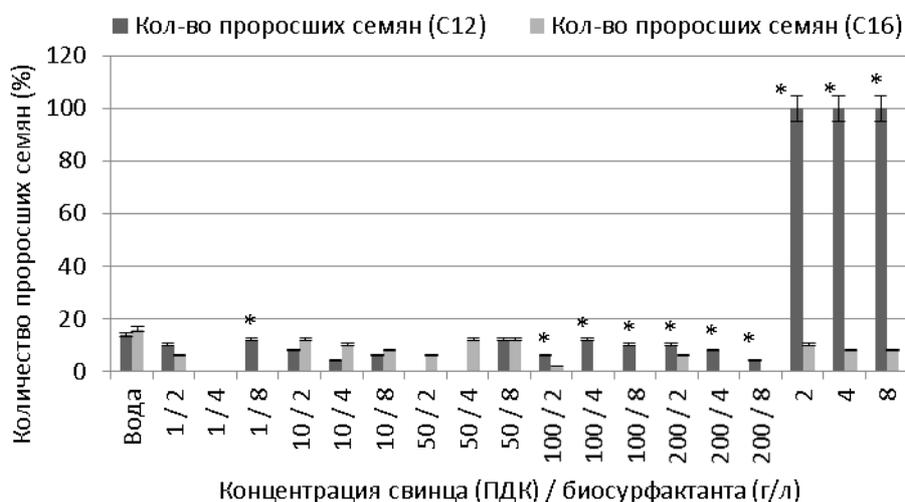


Рис. 4. Всхожесть семян *Sinapis alba* в присутствии ионов свинца и биосурфактантов (ПДК, мг/кг почвы / г/л).

\*Статистически достоверно ( $p < 0,05$ ) от *Rhodococcus*-биосурфактантов C<sub>12</sub>; C<sub>12</sub> – *Rhodococcus*-биосурфактанты, продуцируемые на *n*-додекане; C<sub>16</sub> – *Rhodococcus*-биосурфактанты, продуцируемые на *n*-гексадекане

Рис. 5. Всхожесть семян *Vicia sativa* в присутствии ионов свинца (ПДК, мг/кг почвы)Рис. 6. Всхожесть семян *Vicia sativa* в присутствии ионов свинца и биосурфактантов (ПДК, мг/кг почвы / г/л).

\*Статистически достоверно ( $p < 0,05$ ) от *Rhodococcus*-биосурфактантов C16; C12 – *Rhodococcus*-биосурфактанты, продуцируемые на *n*-додекане; C16 – *Rhodococcus*-биосурфактанты, продуцируемые на *n*-гексадекане

## Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований нами установлено, что наиболее устойчивым растением к действию ионов  $Pb^{2+}$  является овес посевной, менее устойчивы семена вики полевой. Уровень прорастания семян овса колебался от 10 до 92% в зависимости от концентрации ионов свинца. Следует отметить, что побеги и корневая система семян овса при добавлении *Rhodococcus*-биосурфактантов с *n*-гексадеканом, были длиннее на 6.9 и 5.3 см, соответственно, по сравнению с таковым при изучении фитотоксичности ионов  $Pb^{2+}$  в присутствии *Rhodococcus*-биосурфактантов с *n*-додеканом. Семена горчицы и вики при концентрации ионов  $Pb^{2+}$  50 ПДК и выше не прорастали.

Ионы  $Pb^{2+}$  во всех вариантах эксперимента ингибировали прорастание корневой системы у вики полевой, тогда как количество проросших побегов не превышало 12%.

Исследования поддержаны Российским Научным Фондом (14-14-00643) и грантом Комплексной программы УрО РАН (15-12-4-10).

## Библиографический список

- Андреева И.В., Байбеков Р.Ф., Злобина М.В. Фиторемедиация почв, загрязненных тяжелыми металлами // Природообустройство. 2009. № 5. С. 5–10.
- ГН 2.1.7.2041-06. Почва, очистка населенных мест, отходы производства и потребления, санитар-

- ная охрана почвы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве [Электронный ресурс]. 2006. URL: <http://www.gosthelp.ru/text/GN217204106Predelnodopust.html>
- Иванова Н.А., Шарф Н.А. Особенности поглощения и миграции тяжелых металлов в органах растений в условиях Среднего Приобья // Вестник Нижневартовского государственного университета. Сер. Биология. 2011. № 2. С. 3–5.
- Коротченко И.С., Львова В.А. Миграция кадмия и никеля в растениях-фиторемедиантах // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 11 (ч. 2). С. 251–254.
- Костина Л.В., Куюкина М.С., Ившина И.Б. Методы очистки загрязненных тяжелыми металлами почв с использованием (био)сурфактантов (Обзор) // Вестник Пермского университета. 2009. Вып. 10. Биология. № 36. С. 95–110.
- Линдиман А.В. и др. Применение янтарной кислоты в процессе фитоэкстракции свинца и кадмия из загрязненных почв // Вестник МИТХТ. 2010. Т. 5, № 5. С. 102–107.
- MP 2.1.7.2297-07. Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности [Электронный ресурс]. 2007. URL: [http://www.ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/dat\\_a\\_normativ/52/52957/](http://www.ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/dat_a_normativ/52/52957/).
- Пугаев С.В. Содержание свинца, меди и марганца в компонентах антропогенно-измененных биогеоценозов // Российский научный мир. 2013. № 1. С. 43–49.
- Титов А.Ф. и др. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 2007. С. 169.
- Яковичина Т.Ф. Фиторемедиационная способность сельскохозяйственных культур к загрязнению почвы тяжелыми металлами // Естественные и математические науки в современном мире. 2014. № 22. С. 1–5.
- Ivshina I.B. et al. Oil desorption from mineral and organic materials using biosurfactant complexes produced by *Rhodococcus* species // World Journal of Microbiology and Biotechnology. 1998. Vol. 14. P. 711–717.
- Kuyukina M.S. et al. Recovery of *Rhodococcus* biosurfactants using methyl-tertiary butyl ether extraction // J. Microbiol. Meth. 2001. Vol. 46. P. 149–156.
- Mulligan C.N., Wang S. Remediation of a heavy metal-contaminated soil by a rhamnolipid foam // Engineering Geology. 2006. Vol. 85. P. 75–81.
- Andreeva I.V., Baybekov R.F., Zlobina M.V. [Phytoremediation of soil, contaminated by heavy metals]. *Prirodoobustroistvo*, N 5 (2009): pp. 5–11. (In Russ.).
- GN 2.1.7.2041-06. [Soil, purification of populated areas, residuals. Threshold limit concentration of chemical substances in the soil] Available at: <http://www.gosthelp.ru/text/GN217204106Predelnodopust.html>. (In Russ.).
- Ivanova N.A., Sharf N.A. [Peculiarities of heavy metals absorption and migration in plant organs in the areas of Middle Priobye]. *Vestnik Nižnevarтовского gosudarstvennogo universiteta. Ser. Biologija*, N 2 (2011): pp. 3–5. (In Russ.).
- Ivshina I.B., Kuyukina M.S., Philp J.C., Christofi N. Oil desorption from mineral and organic цы224materials using biosurfactant complexes produced by *Rhodococcus* species. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. V. 14 (1998): pp. 711–717.
- Korotchenko I.S., Lyvova V.A. [The migration of cadmium and nickel in the plants capable of phytoremediation]. *Meždunarodnuj žurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*. № 11 (p. 2) (2015): pp. 251–254. (In Russ.).
- Kostina L.V., Kuyukina M.S., Ivshina I.B. [Methods of restoration of soil contaminated with heavy metals with the usage of (bio)surfactants]. *Vestnik Permskogo universiteta*, Iss. 10 (Biologija) (2009): pp. 95–110. (In Russ.).
- Kuyukina M.S. et al. Recovery of *Rhodococcus* biosurfactants using methyl-tertiary butyl ether extraction. *J. Microbiol. Meth.* Vol. 46 (2001): pp. 149–156.
- Lindiman A.V., Shvedova L.V., Tukumova N.V. [Employment of the succinic acid to phytoextraction cadmium and lead from contained soils]. *Vestnik MITXT*, V. 5, N 5 (2010): pp. 102–107. (In Russ.).
- MR 2.1.7.2297-07. [Justification of the hazard class of production and consumption waste on the ground of its phytotoxicity] Available at: [http://www.ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/dat\\_a\\_normativ/52/52957/](http://www.ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/dat_a_normativ/52/52957/). (In Russ.).
- Mulligan C.N., Wang S. Remediation of a heavy metal-contaminated soil by a rhamnolipid foam. *Engineering Geology*. V. 85 (2006): pp. 75–81.
- Pugaev S.V. [Lead, copper and manganese in the components of anthropogenically influenced biogeocenoses]. *Rossijskij naučnyj mir*, N 1 (2013): pp. 43–49. (In Russ.).
- Titov A.F. et al. *Ustojčivost' rastenij k tjaželym metallam* [Plants' resistance to heavy metals]. Petrozavodsk, 2007. 164 p. (In Russ.).
- Yakovichina T.F. [The ability of agricultural crops to phytoremediate soil contaminated with heavy metals]. *Estestvennye i matematičeskie nauki v sovremenном mire*, N 22 (2014): pp. 1–5. (In Russ.).

Поступила в редакцию 11.01.2017

**Об авторах**

Литвиненко Людмила Викторовна, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории алканотрофных микроорганизмов ФГБУН Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН

**ORCID:** 0000-0003-3138-3035

614081, Пермь, ул. Голева, 13; lkostina@list.ru; (342)2808114

Тищенко Артём Валерьевич, аспирант лаборатории алканотрофных микроорганизмов ФГБУН Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН

**ORCID:** 0000-0002-9718-0786

614081, Пермь, ул. Голева, 13; artem.dark.introvert@gmail.com

**About the authors**

Litvinenko Lyudmila Viktorovna, Candidate of biology, researcher of the Laboratory of Alkanotrophic Microorganisms Institute of Ecology and Genetics of Microorganism UB RAS

**ORCID:** 0000-0003-3138-3035

13, Golev str., Perm, Russia, 614081; lkostina@list.ru; (342)2808114

Tishchenko Artyon Valerevich, Phd student of the Laboratory of Alkanotrophic Microorganisms Institute of Ecology and Genetics of Microorganism UB RAS

**ORCID:** 0000-0002-9718-0786

13, Golev str., Perm, Russia, 614081; artem.dark.introvert@gmail.com



