

## АНАЛИЗ ФИТОРЕМЕДИАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

**Р.Ф. Байбеков, д.с.-х.н, ВНИИА, М.В. Злобина, к.б.н., Б.А. Борисов, д.б.н., О.Е. Ефимов, к.с.-х.н., Н.Ф. Ганжара, д.б.н., РГАУ-МСХА**

*Установлены состояние, степень накопления биологической массы и фиторемедиационный потенциал 17 видов сельскохозяйственных, дикорастущих и декоративных растений в условиях вегетационного опыта при разных уровнях загрязнения тяжёлыми металлами. Рассчитано время необходимое для очистки почв растениями от тяжёлых металлов*

*Ключевые слова: тяжёлые металлы, кадмий, свинец, цинк, медь, кобальт, никель, коэффициенты биологического поглощения, накопления, усвоения, транслокационный коэффициент.*

В настоящее время в индустриально развитых странах активно развиваются экономичные и мягкие технологии ремедиации почв, загрязнённых тяжёлыми металлами. В основе их лежит способность специально подобранных видов высших растений и ассоциированной с ними микробиоты поглощать и аккумулировать в своей биомассе тяжёлые металлы в количествах, значительно превышающих их содержание в среде произрастания.

Впоследствии загрязнённая биомасса удаляется и утилизируется. В настоящее время в мире идентифицировано около 400 видов растений – гипераккумуляторов различных металлов из 22 семейств, использование которых в качестве фиторемедиантов вызывает у исследователей большой интерес.

В области фиторемедиации работают научные коллективы во многих странах мира, в том числе в России. В работах [1-8] изложены основы фиторемедиации и изучена фиторемедиационная способность ряда растений. Вместе с тем, при изучении процессов фиторемедиации затрагивается большой круг вопросов, касающихся поведения тяжёлых металлов в системе почва – растение, что усиливает актуальность исследований по данной тематике.

Цель исследований – выявить перспективные технологии возделывания растений с использованием анализа фиторемедиационного потенциала в условиях загрязнения почвы тяжёлыми металлами.

**Методика.** Объект исследования – дерново-подзолистая среднесуглинистая почва, отобранная на Полевой опытной станции РГАУ-МСХА со следующими показателями:  $pH_{\text{кол}}$  5,7,  $pH_{\text{вод}}$  6,9, содержание органического вещества 2,3%, гидролитическая кислотность 3,1 ммоль/100 г, сумма поглощённых оснований 16,3 ммоль/100 г, содержание подвижного фосфора 120 и подвижного калия 104 мг/кг.

В ходе исследований проведено определение содержания подвижных форм тяжёлых металлов в почве, в надземной части опытных растений и в корнях при одновременном учёте массы побегов и корней.

При определении элементов в растительных образцах пробоподготовку проводили в СВЧ-минерализаторе Anton Paar Multiwave 3000. Подвижные формы металлов определяли в ацетатно-аммонийной вытяжке. Содержание тяжёлых металлов устанавливали атомно – абсорбционным методом посредством спектрометра ААС КВАНТ – 2 АТ согласно РД 52.18.191-90. Результаты определений измеряли в мг/кг сухой почвы и сухой массы растений.

Для проведения исследований использовали методику постановки вегетационного опыта в сочетании с моделированием загрязнения почвы несколькими тяжёлыми металлами. В ходе исследований учитывали: суммарный показатель загрязнения, коэффициент биологического поглощения, коэффици-

ент накопления, транслокационный коэффициент и коэффициенты усвоения.

Суммарный показатель загрязнения (СПЗ) – наиболее распространённый геохимический показатель при оценке комплекса химического загрязнения почв. Рассчитывают его по формуле  $СПЗ = \sum K_c - (n - 1)$ , где  $K_c$  – коэффициент концентрации аномального содержания элемента относительно его фонового содержания,  $n$  – число аномальных элементов.

Уровень загрязнения считается низким, если СПЗ находится в пределах 0–16, средним (умеренно опасным) при СПЗ=16–32, высоким (опасным), если СПЗ=32–128; очень высоким (чрезвычайно опасным), если СПЗ >128.

**Коэффициент биологического поглощения (КБП)** представляет собой отношение содержания элемента в золе растений (надземной части) к его валовому содержанию в почве (Перельман, 1996). Если коэффициент биологического поглощения больше 1, то можно говорить о способности растения аккумулировать тот или иной элемент.

**Коэффициент накопления (КН)** – это отношение содержания элемента в надземной массе растения к его валовому содержанию в почве.

**Коэффициенты усвоения (КУ)** рассчитывали как отношение содержания элемента в золе ( $KU_1$ ) и в массе надземной части растений ( $KU_2$ ) к содержанию его подвижных форм в почве.

**Транслокационный коэффициент (ТК)** отражает способность растений транспортировать те или иные элементы из корней в надземную часть и представляет собой отношение содержания элемента в надземной части растений к его содержанию в корнях. Чем он выше, тем в большей степени растение подходит для ремедиации.

Была проведена количественная оценка тесноты связи между СПЗ и КБП, КН,  $KU_1$ ,  $KU_2$ , ТК, а также между СПЗ и накоплением растениями биомассы. Для этого был рассчитан коэффициент корреляции  $r$ . Чем он ближе к 0, тем слабее связь между величинами. Наиболее тесная связь при прямой корреляции соответствует коэффициенту  $r$ , близкому к +1 (при обратной – к -1). Для оценки статистической достоверности факта обнаруженной связи использовали корреляционную поправку  $Sr = (1 - r^2) / (n - 1)^{1/2}$ . Связь нельзя считать случайной при  $|r/Sr| \geq 3$ . Расчёты осуществляли в Microsoft Office Excel 2003.

Для КБП, КН и КУ был произведён расчёт средних значений для каждого уровня загрязнения. В случае превышения значения того или иного коэффициента соответствующего среднего значения делали вывод о повышенной аккумулятивной способности растения по отношению к одному или нескольким элементам.

Для оценки реальности применения растений в целях фиторемедиации были рассчитаны ориентировочные временные интервалы, необходимые для очистки почвы от тяжёлых металлов посредством испытываемых культур. Расчёт производили для растений с максимальными значениями КБП, КН, КУ при разных уровнях загрязнения почвы по следующей схеме: 1. Определение избытка валовых / подвижных форм элемента в почве (мг) при данном уровне загрязнения по сравнению с контрольным (массу пахотного слоя площадью 1 м<sup>2</sup> принимали равной 300 кг); 2. Используя данные по биомассе надземной части растений одного сосуда, количеству растений в сосуде и числу растений, необходимых

для посева/посадки на 1 м<sup>2</sup> была найдена биомасса, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup>; 3. Исходя из известного содержания металлов в надземной части растений (по результатам анализов) и найденной биомассы (п.2), рассчитывали вынос валовых/подвижных тяжёлых металлов с 1 м<sup>2</sup>. 4. Зная избыток элемента на 1 м<sup>2</sup> и вынос его с этой площади, был определен временной интервал, необходимый для очистки почвы.

Схема опыта:

1. NPK (контроль);
2. NPK + Co<sub>5</sub>Zn<sub>100</sub>Ni<sub>30</sub>Cd<sub>1</sub>Cu<sub>60</sub>Pb<sub>60</sub> (низкий уровень загрязнения, СПЗ=12);
3. NPK + Co<sub>15</sub>Zn<sub>300</sub>Ni<sub>90</sub>Cd<sub>3</sub>Cu<sub>180</sub>Pb<sub>180</sub> (средний уровень загрязнения, СПЗ=36);
4. NPK + Co<sub>25</sub>Zn<sub>500</sub>Ni<sub>150</sub>Cd<sub>5</sub>Cu<sub>300</sub>Pb<sub>300</sub> (высокий уровень загрязнения, СПЗ=60).

Повторность опыта трёхкратная.

В опыте были использованы 17 видов сельскохозяйственных, дикорастущих и декоративных растений, относящихся к 9 различным семействам: Амарантовые (амарант бисквитный), Бобовые (донник жёлтый), Губоцветные (шалфей лекарственный), Злаковые (кукуруза, просо декоративное, сорго сахарное), Крестоцветные (горчица белая, редька масличная, сурепица яровая), Маревые (марь белая), Норичниковые (львиный зев), Паслёновые (душистый табак) и Сложноцветные (астры, бархатцы, василёк синий, календула лекарственная).

Опыт закладывали в пластмассовых сосудах объёмом 5 л. Использовали сульфаты кадмия, никеля, цинка, меди, кобальта и ацетат свинца. Расчёт вносимых доз солей тяжёлых металлов производили на массу абсолютно сухой почвы с учётом её влажности. Полив проводили по необходимости до уровня 70% НВ. Исследования вели в течение трёх лет.

В данной работе рассмотрены результаты исследований по кадмию (по остальным металлам - в последующих статьях).

**Результаты и их обсуждение.** Для большинства культур в сосудах с контрольным вариантом и в варианте с низким уровнем загрязнения опытные растения развивали большую биомассу, внешних признаков угнетения не наблюдалось. При среднем и высоком уровнях загрязнения растения по-разному реагировали на присутствие тяжелых металлов в среде произрастания. В большинстве случаев уже на стадии проростков проявлялись внешние признаки токсикоза, что выражалось в изменении окраски вегетативной массы и замедлении скорости роста. На более поздних стадиях развития растений были отмечены ярко выраженный некроз, антоциановая окраска листьев и побегов, гниение корней, неодинаковое наступление фаз развития.

В таблице представлены результаты учёта биомассы опытных растений.

У таких растений, как марь белая, донник жёлтый, горчица белая, кукуруза, амарант бисквитный, астры, василёк синий, львиный зев и сорго сахарное, наибольшее накопление биомассы наблюдалось в варианте с внесением тяжелых металлов при низком уровне загрязнения. Это является, очевидно, следствием неоднократно отмечаемого многими исследователями определенного стимулирующего эффекта под действием низких концентраций тяжелых металлов.

Наиболее устойчивыми к комплексному загрязнению почвы тяжёлыми металлами были растения редьки масличной, календулы лекарственной и бархатцев. Масса их надземной части не изменялась с увеличением степени загрязнения, а у редьки масличной увеличилась по сравнению с контролем на 32%. Наименьшей устойчивостью к действию тяжёлых металлов отличались душистый табак, просо декоративное и шалфей лекарственный. Биомасса этих растений снижалась по мере увеличения уровня загрязнения почвы.

Следует отметить, что растения кукурузы, алиссума морского, проса декоративного, сорго сахарного, и в особенности табака душистого и шалфея лекарственного в полевых условиях обычно имеют значительно большую массу побегов по сравнению с полученной в вегетационном опыте.

Изменение массы корней по вариантам происходило по-разному, в зависимости от вида растения. У донника, горчицы, кукурузы, львиного зева и сорго сахарного, подобно массе надземной части, наблюдалось существенное увеличение массы корней при низком уровне загрязнения, при повышении уровня загрязнения происходило её снижение. Аналогично изменялась масса корней алиссума и редьки масличной. У таких растений, как марь белая, амарант и просо декоративное, масса корней уменьшалась с увеличением уровня загрязнения почвы, а у астр, календулы и василька данный показатель существенно снизился лишь в последнем варианте опыта. Самыми чувствительными оказались шалфей и табак – масса корней снизилась в 2,1-2,2 раза уже при низком уровне загрязнения. Масса корней бархатцев оставалась неизменной. Только у сурепицы яровой данный показатель существенно увеличивался с повышением степени загрязнения почвы.

**Биомасса растений при разных уровнях загрязнения почвы тяжёлыми металлами**  
(числитель – надземная часть, знаменатель – корни)

Растение	Контроль	Уровень загрязнения			НСР <sub>0,05</sub>
		низкий	средний	высокий	
Марь белая	36,1	30,6	19,2	6,9	2,0
	8,1	7,3	2,7	0,6	0,2
Донник жёлтый	27,5	33,3	12,9	26,1	2,9
	9,6	11,3	7,9	5,5	0,9
Сурепица	15,8	15,2	18,9	16,8	2,6
	9,0	10,2	11,7	13,6	1,1
Горчица белая	25,2	29,2	1,2	23,3	3,4
	1,6	1,7	1,3	0,2	0,4
Редька масличная	24,3	35,7	26,3	31,1	3,2
	1,7	3,4	2,4	1,7	0,5
Кукуруза	25,8	20,8	11,2	10,8	2,7
	5,8	6,3	2,8	1,9	0,9
Алиссум морской	2,8	3,4	3,1	2,4	0,5
	0,3	0,5	0,4	0,2	0,2
Амарант бисквитный	57,5	50,2	12	31,4	4,1
	9,3	7,6	4,0	2,4	1,6
Астры	17,8	12,7	8,5	7,4	1,6
	2,3	1,8	1,7	0,3	0,8
Бархатцы	16,2	14,1	16,9	14,1	2,5
	2,1	1,9	1,8	1,9	0,4
Василёк синий	24,8	21,9	1,6	26,6	5,6
	1,5	1,4	1,7	0,2	0,5
Душистый табак	8,2	6,4	3,3	2,8	0,7
	1,1	0,5	0,4	0,2	0,4
Календула лекарственная	12,7	11,68	11,68	9,53	1,5
	4,4	4,1	3,9	3,2	0,5
Львиный зев	23,7	17	20,6	14,5	2,8
	2,7	3,3	2,3	1,5	0,4
Просо декоративное	55,8	47	5,6	33,9	3,6
	13,4	11,6	8,1	0,9	1,5
Сорго сахарное	21,7	27,7	24,2	23,7	4,7
	18,7	25,5	22,1	21,9	5,7
Шалфей лекарственный	3,1	0,9	0,3	0,3	0,4
	1,7	0,8	0,5	0,4	0,4

Таким образом, можно констатировать, что растения различаются по степени толерантности к повышенному содержанию тяжелых металлов в почве.

В результате корреляционного анализа была выявлена сильная обратная связь между надземной биомассой и СПЗ для растений мари ( $r=-0,99$ ,  $Sr=0,002$ ,  $|r/Sr|=486$ ), донника жёлтого ( $r=-0,88$ ,  $Sr=0,13$ ,  $|r/Sr|=6,78$ ), горчицы белой ( $r=-0,89$ ,  $Sr=0,12$ ,  $|r/Sr|=7,55$ ), кукурузы ( $r=-0,92$ ,  $Sr=0,09$ ,  $|r/Sr|=10$ ), амаранта ( $r=-0,99$ ,  $Sr=0,01$ ,  $|r/Sr|=99$ ), астр ( $r=-0,90$ ,  $Sr=0,11$ ,  $|r/Sr|=8,4$ ), бархатцев ( $r=-0,91$ ,  $Sr=0,10$ ,  $|r/Sr|=9,11$ ), василька синего ( $r=-0,91$ ,  $Sr=0,10$ ,  $|r/Sr|=8,99$ ), душистого табака ( $r=-0,94$ ,  $Sr=0,07$ ,  $|r/Sr|=12,98$ ), календулы ( $r=-0,92$ ,  $Sr=0,09$ ,  $|r/Sr|=10,6$ ), львиного зева ( $r=-0,80$ ,  $Sr=0,21$ ,  $|r/Sr|=3,7$ ) и шалфея лекарственного ( $r=-0,75$ ,  $Sr=0,25$ ,  $|r/Sr|=3,0$ ). Для остальных растений опыта выявленная связь носила случайный характер.

*Характеристика ремедиационной способности растений по отношению к кадмию.* Наибольшее содержание кадмия в корнях отмечено в условиях сильного загрязнения у мари

белой (165,5 мг/кг), а также у львиного зева (67,9 мг/кг), амаранта бисквитного (70,2 мг/кг) и бархатцев (73,6 мг/кг). Однако его содержание в надземной части мари и бархатцев при всех уровнях загрязнения намного ниже, чем у амаранта и львиного зева (у мари резко снизилось в последнем варианте). У амаранта бисквитного содержание кадмия в побегах увеличивалось от 0,2 мг/кг в контрольном варианте до 104,1 мг/кг при высоком уровне загрязнения, у львиного зева – от 0,1 до 103,9 мг/кг соответственно.

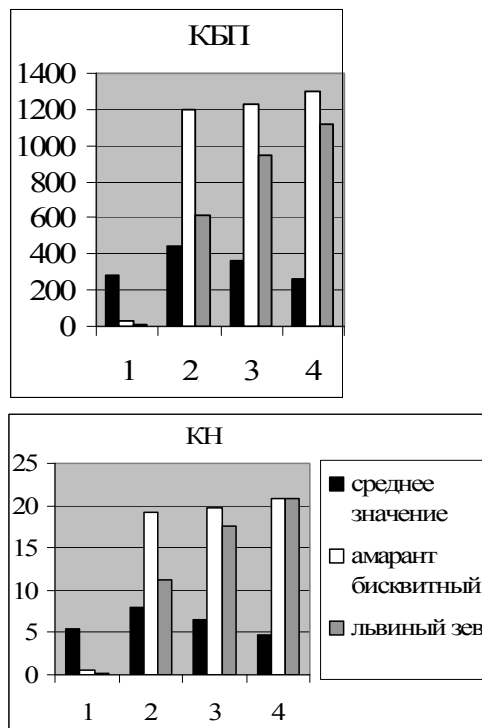


Рис.1. Коэффициенты биологического поглощения и накопления кадмия для амаранта бисквитного и львиного зева (здесь и далее 1–контроль, 2–низкий уровень загрязнения, 3–средний уровень, 4–высокий уровень загрязнения)

Значения КБП, КН и КУ для данных растений превышали средние показатели во всех вариантах опыта, кроме контрольного. Содержание кадмия в надземной части данных растений при среднем уровне загрязнения в 2 раза превышало таковое в корнях (ТК для амаранта бисквитного составил 1,98, львиного зева – 2,04), при высоком уровне – в 1,5 раза (1,48 и 1,53 соответственно).

Расчёт временных периодов показал, что для очистки почв от валового/подвижного кадмия посредством амаранта бисквитного потребуется при низком уровне загрязнения 78/69 лет, при среднем – 131/125 и при высоком – 176/173 года, посредством львиного зева – 73/86, 56/76 и 71/69 лет соответственно.

Корреляционный анализ не выявил связи между СПЗ и КБП, КН, КУ.

Таким образом, можно сделать вывод, что среди изученных растений амарант и львиный зев обладают наиболее выраженной аккумулятивной способностью по отношению к кадмию в условиях комплексного загрязнения почвы. Однако для ремедиации данные растения не подходят из-за большого временного периода, необходимого для очистки.

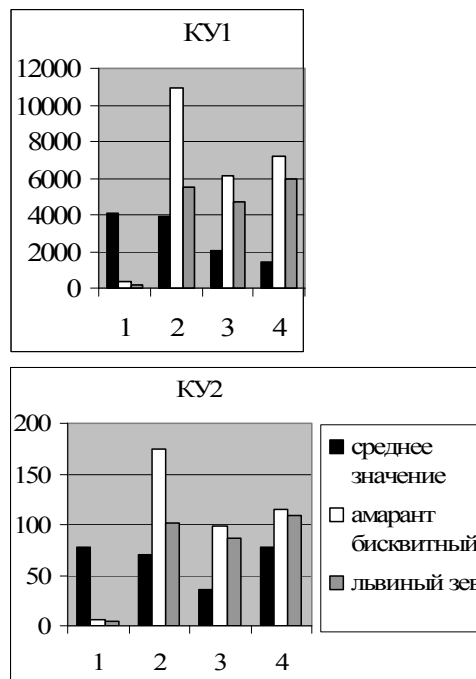


Рис.2. Коэффициенты усвоения кадмия для амаранта бисквитного и львиного зева при разных уровнях загрязнения почвы тяжёлыми металлами

#### Литература

1. Большаков В.А., Краснова Н.М., Борисочкина Т.И., Сорокин С.Е. и др. Аэротехногенное загрязнение почвенного покрова тяжёлыми металлами: источники, масштабы, рекультивация. – Почвенный институт имени В.В. Докучаева. – М., 1993. – 91 с. 2. Бондарев Л.Г. Микроэлементы – благо и зло. – М.: Знание, 1984. – 144 с. 3. Борисочкина Т.И., Водяницкий Ю.Н. Загрязнение агроландшафтов России тяжёлыми металлами: источники, масштабы, прогнозы // Бюллетень почвенного института имени В.В. Докучаева, М., 2007; в.60. – С. 82–89. 4. Борисочкина Т.И., Ефремов В.В., Кайданова О.В. Биологический круговорот и баланс микроэлементов на типичных черноземах различной окультуренности // Тез. докл. 8 Всес. съезда почвоведов (г. Новосибирск, 14–18 августа 1989г.). – Новосибирск, 1989. – Кн. 3. – Комис. 4. – С.102. 5. Буравцев В.Н., Головатый В.Г., Котова Е.А., Головатая Н.Н., и др. Подбор растений для фиторемедиации почв, загрязнённых тяжёлыми металлами // Международная научная конференция (Костяковские чтения). ВНИИ гидротехники и мелиорации. – М., 2005. – С. 282 – 286. 6. Буравцев В. Н., Крылова Н. П. Современные технологические схемы фиторемедиации загрязнённых почв // Сельскохозяйственная биология. Серия Биология растений. – 2005. – №5. – С. 67 – 75. 7. Виноградов А.П. Закономерности распределения химических элементов в земной коре // Геохимия. – 1963. – №7. – С. 128–134.

## ANALYSIS OF THE PHYTOREMEDIATION POTENTIAL OF PLANTS ON SODDY-PODZOLIC SOILS CONTAMINATED WITH HEAVY METALS

R.F. Baibekov<sup>1</sup>, M.V. Zlobina<sup>2</sup>, B.A. Borisov<sup>2</sup>, O.E. Efimov<sup>2</sup>, N.F. Ganzhara<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pryanishnikov All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry, Russian Academy of Agricultural Sciences, ul. Pryanishnikova 31 a, Moscow, 127550 Russia

<sup>2</sup>Russian State Agricultural University – Moscow Agricultural Academy, Russian Academy of Sciences, ul. Timiryazeva 49, Moscow, 127550 Russia

The state, the degree of biomass accumulation, and the phytoremediation potential of 17 species of agricultural, wild, and ornamental plants at different levels of soil contamination with heavy metals were studied in a pot experiment. The time period necessary for the remediation of soils from heavy metals by plants was calculated.

Keywords: heavy metals, cadmium, lead, zinc, copper, cobalt, nickel; coefficients of biological uptake, accumulation, assimilation, translocation.