УДК 57.044

Елизарьева Е.Н.[1], Янбаев Ю.А.[1], Кулагин А.Ю.[2]
[1]Башкирский государственный университет
[2] Уфимский институт биологии РАН
E-mail: elizareva_en@mail.ru ; yanbaev_ua@mail.ru ; coolagin@list.ru

РАСТЕНИЯ ДЛЯ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ ВОДЫ, ЗАГРЯЗНЕННОЙ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

В настоящее время растущее поступление тяжелых металлов со сточными водами в природные водоемы приобретает характер глобальной экологической угрозы. Наносящие серьезный экологический ущерб, тяжелые металлы обладают биологической активностью, мутагенными и канцерогенными свойствами, приводящими к отравлению и гибели организмов. Для минимизации отрицательного влияния тяжелых металлов на гидросферу необходима разработка новых и усовершенствование существующих методов очистки стоков. Наиболее эффективными, рациональными и экологичными могут стать способы очистки, основанные на способности растений аккумулировать токсиканты.

С целью подбора видов растений, пригодных для фиторемедиации сточных вод, проведены исследования характеристик 18 растений, выращиваемых на модельных растворах, содержащих тяжелые металлы. Показано, что при добавлении смеси ионов цинка, меди, кадмия, никеля и хрома, растения поглощают их из раствора в меньших количествах, чем при добавлении в питательный раствор только кадмия или только никеля. При этом смесь металлов оказывается более токсичной для растений, чем индивидуальные металлы. Проведено сравнение концентраций тяжелых металлов в сырой биомассе растений со значениями предельно-допустимых концентраций металлов в продуктах питания и максимально допустимым уровнем их содержания в корме скота.

Установлен антагонизм аккумуляции металлов растениями при синергизме их токсического действия. Осуществлен выбор 2 сортов кабачка, кукурузы и 1 сорта капусты для фиторемедиации сточных вод, содержащих смесь тяжелых металлов, с возможностью последующего применения полученной биомассы в качестве корма для скота.

Ключевые слова: тяжелые металлы, токсичность, аккумуляция, толерантность, транслокация, предельно-допустимая концентрация

Разнообразные комбинативные сочетания и концентрации разных металлов в среде приводят к изменениям свойств отдельных элементов в результате их синергического или антагонистического воздействия на живые организмы. Установлено, что смесь цинка и меди для растений в несколько раз токсичнее, чем арифметически полученная сумма их токсичности [1], [2]. Подобным образом действует и смесь цинка с никелем [3]. Однако существуют наборы металлов, совместное действие которых характеризуется аддитивностью или антагонизмом. Наглядным примером этого являются цинк и кадмий, проявляющие взаимный физиологический антагонизм [4]. В случае сильного загрязнения почв кадмием, в почвы вносят цинк, который снижает поступление кадмия в растения [5]. Отмечены проявления синергизма и антагонизма металлов и в многокомпонентых смесях [2]. Таким образом, суммарный токсикологический эффект от загрязнения среды ТМ зависит не только от набора и уровня содержания конкретных элементов, но и особенностей их взаимного воздействия.

С целью подбора видов растений, пригодных для выращивания зеленой массы на сточных водах, загрязненных смесью тяжелых металлов, проведены исследования фиторемедиационных характеристик растений, выращиваемых на модельных растворах, содержащих смесь ионов цинка, меди, кадмия, никеля и хрома.

Материалы и методы

Семена растений, названия которых приведены в таблице 1, проращивались в чашках Петри на песке в течение 4–7 дней. Дальнейший рост происходил на сетке, укрепленной на горловине сосуда, заполненного раствором Хоагланда, разбавленного в 4 раза по сравнению с оригинальной рецептурой (1/4-strength modified) [6].

Через 2 недели в раствор добавлялись тяжелые металлы. Концентрация ионов металлов в смеси (таблица 2) выбрана на основе литературных данных, свидетельствующих о том, что данный уровень не приводит к гибели растений [6]. В таблице 2 показано также отношение

концентрации металла в растворе к значению ПДК для водоемов хозяйственно-питьевого (ПДКх.п.в.) и рыбохозяйственного (ПДКр.х.) назначения.

Для сравнения особенностей аккумуляции тяжелых металлов растениями, добавленных в смеси и индивидуально был проведен эксперимент с выращиванием растений в гидропонном растворе с добавлением только кадмия и только никеля. Концентрация обоих металлов та же, что и в смеси – 5μM.

В этих условиях растения выращивались в течение 3-х недель в теплице при температуре 25–27°C. После этого, извлеченные из сосудов с гидропонным раствором растения разделялись на 2 части: зеленая масса и корни, промывались проточной, а затем дистиллированной водой и высушивались в сушильной печи в течение суток при температуре 70°C. Сухая биомасса растений взвешивалась, после чего измельчалась в настольной мельнице (Glen Creston hammer cutter mill) с 1,5 мм сеткой.

По результатам взвешивания сухой биомассы растений рассчитывался индекс толерантности для побегов (ИТП), корней (ИТК) и всей биомассы исследуемых растений (ИТБ) (таблица 3).

Измельченная биомасса растений подвергалась кислотной минерализации. Содержание металлов определялось методом пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС).

По полученным концентрациям рассчитывались транслокационный и биоконцентрационный факторы растений (таблица 3).

Таблица 1. Перечень использованных видов и сортов растений

Растение	Видовое название [7]	Сорта	Условное обозначение
Тыква	Cucurbita pepo L.	Mini pak	MP
Редис	Raphanus sativus L.	French breakfast	FB
		Cherry belle	CB
		Long white icicle	LWI
		Mixed	M
Огурец	Cucumis L.	Prolific F1	P
		F1 burpless tasty green	BTG
		Crystal lemon	CL
Кабачки	Cucurbito pepo L.	Ambassador F1	A
		All green bush	AGB
		Zucchini	Z
		Golden zucchini	GZ
Кукуруза	Zea mays L.	F1 Sweet nugget	SN
		F1 Kelvedon glory	KG
Капуста	Brassica L.	Brunswick	B
		F1 Celtic	F1C
Салат	Lactuca sativa L.	Arctic king	AK
		Iceberg 2	I2

Таблица 2. Состав раствора смеси тяжелых металлов

Ион металла	Концентрация		Отношение концентрации металла к значению ПДК	
	μM	мг/л	$C_м$ /ПДК$_{х.п.в.}$	$C_м$ /ПДК$_{р.х.}$
Zn^{2+}	94	6,10	6	610
Cu^{2+}	2	0,11	0,1	110
Cd^{2+}	5	0,55	550	110
Ni^{2+}	5	0,29	3	29
Cr^{3+}	1	0,06	0,1	1

Результаты и обсуждение

Результаты расчетов индекса толерантности приведены на рисунке 1. Анализ индекса толерантности показал, что его величина не превышает 100%, что существенно отличается от данных для индивидуальных металлов [12]. Это свидетельствует о том, что смесь металлов оказывает более угнетающе действие на рост растений, чем индивидуальные металлы, которые при низких концентрациях могут выступать в качестве стимуляторов роста растений (ИТБ > 100%). Величина ИТП значительно больше ИТК на 17-42% для всех сортов редиса и кабачков сортов AGB и Z. ИТК превышает ИТП у огурца CL (на 12%) и кабачка GZ (на 6%). В остальных случаях (огурец P и BTG, кабачок A, тыква MP, кукуруза SN и KG, капуста B и F1C,салат I2 и AK) величины ИТП и ИТК примерно одинаковы (разница не превышает 3%).

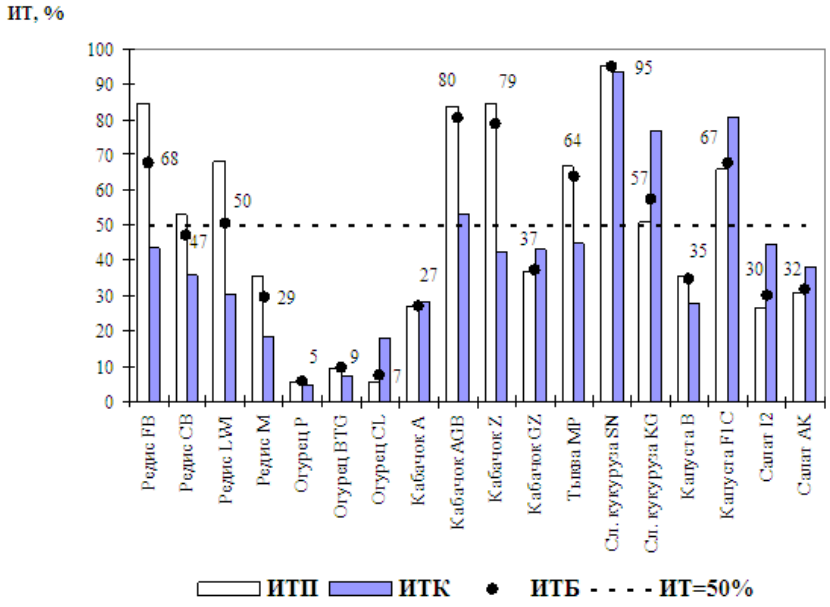

Рисунок 1. Индекс толерантности растений (%)

Индексом толерантности биомассы, превышающим 50%, характеризуются редис FB, кабачок AGB и Z, тыква MP, оба сорта сладкой кукурузы и капуста F1C. Самым низким индексом толерантности обладают все сорта огурца. Значительно угнетается рост редиса M и салата I2 и AK (рисунок 2).

Сравнение индекса толерантности разных сортов одного вида растений показало, что ИТБ капусты F1C значительно превышает этот показатель для капусты B, ИТБ кукурузы SN превышает ИТБ кукурузы KG, значительные различия наблюдаются для ИТБ разных сортов редиса.

Рисунок 2. Салат I2, выращенный в растворе Хоагланда (слева) и с добавкой смеси тяжелых металлов (справа)

В таблице 4 приведены результаты исследований по содержанию металлов в растениях.

По полученным значениям концентраций согласно формуле (2) был рассчитан транслокационный фактор ТФ (таблица 5) для всех анализируемых металлов, за исключением хрома, концентрация которого в побегах всех растений была ниже предела обнаружения. Растения, фактор транслокации для которых ≥ 1, в таблице выделены фоном.

Анализ полученных данных показал, что за исключением нике-

Таблица 3. Показатели оценки эффективности применения различных растений для фиторемедиации

Показатели эффективности	Количественная оценка показателя	
	Формула	Градация
Толерантность к металлам	Индекс толерантности: (1), где $M_м$ – вес сухой биомассы растения, выращенного с добавлением металлов, г; $M_к$ – вес сухой биомассы контрольного растения, выращенного в растворе Хоагланда, г. Индекс толерантности рассчитывается для побегов (ИТП), корней (ИТК) и всей биомассы в целом (ИТБ).	ИТ>100% – стимулирующее воздействие; ИТ = 100% – отсутствие влияния; ИТ<100% – угнетающее влияние анализируемых концентраций тяжелых металлов на рост растения; ИТ = 50% – минимальный желательный объем биомассы при произрастании на загрязненной среде [8].
Транслокация металлов внутри растения	Транслокационный фактор: $ТФ = \frac{C_п}{C_к}$ (2), где $C_п$ – концентрация металла в побегах, мг/г; $C_к$ – концентрация металла в корнях, мг/г.	Значение ТФ<1 свидетельствует об аккумуляции металлов преимущественно в корнях, ТФ>1 – в побегах [9,10]
Способность аккумулировать металлы (по отдельности и в смеси)	Биоконцентрационный фактор: $БКФ = \frac{C_{раст.к.}}{C_{р-р}}$ (3), где $C_{раст.к.}$ – концентрация металла в корнях, мг/г; $C_{р-р}$ – концентрация металла в растворе, мг/л.	Значение БКФ>1000 является критерием отнесения растения к гипераккумуляторам [11]

Таблица 4. Концентрация металлов в побегах и корнях растений, выращенных в присутствии смеси металлов, мг Ме/кг сухой массы

Растения	Zn		Cu		Cd		Ni		Cr	
	Побеги	Корни	Побеги	Корни	Побеги	Корни	Побеги	Корни	Побеги	Корни
Редис FB	13,4	66,2	0,5	7,4	1,7	6,3	1,0	1,7	<0,5	2,7
Редис CB	15,8	96,9	1,1	10,0	2,1	7,5	0,5	2,0	<0,5	6,6
Редис LWI	11,4	83,3	1,1	7,1	1,6	7,1	0,3	1,4	<0,5	3,8
Редис M	17,9	68,9	0,6	7,4	2,6	6,4	1,4	1,2	<0,5	5,7
Огурец P	33,7	72,8	0,5	10,8	2,9	14,3	1,3	2,3	<0,5	9,1
Огурец BTG	42,7	124,1	0,7	12,7	3,4	21,0	1,7	2,6	<0,5	6,4
Огурец CL	43,33	95,7	0,42	15,1	3,53	18,3	1,39	2,3	<0,5	15,3
Кабачок A	23,5	24,5	0,4	6,2	2,0	15,2	1,1	3,1	<0,5	2,4
Кабачок AGB	21,1	1050,0	0,7	9,3	1,3	12,0	0,8	2,2	<0,5	6,7
Кабачок Z	24,7	132,6	0,4	11,1	1,9	17,8	1,2	3,1	<0,5	8,2
Кабачок GZ	23,3	116,1	<0,5	8,4	1,5	18,5	0,7	1,9	<0,5	7,6
Тыква MP	40,8	451,9	1,1	7,3	1,3	13,1	0,3	2,4	<0,5	3,4
Кукуруза SN	9,0	37,7	<0,5	4,5	0,4	5,8	<0,5	2,7	<0,5	2,6
Кукуруза KG	6,0	89,3	<0,5	3,5	1,1	8,1	<0,5	1,9	<0,5	2,3
Капуста B	30,5	164,1	<0,5	15,0	2,8	15,2	1,3	3,5	<0,5	11,5
Капуста F1C	21,7	115,5	0,5	7,7	2,3	6,9	1,2	2,5	<0,5	4,0
Салат I2	21,6	52,3	0,6	6,4	1,6	5,9	0,7	1,8	<0,5	2,0
Салат AK	21,21	48,0	0,5	6,5	2,5	9,7	1,4	1,8	<0,5	3,4

ля (редис М) и цинка (кабачок А), концентрация металлов в корнях существенно выше, чем в побегах независимо от вида растения. Транслокационный фактор практически для всех растений существенно ниже единицы. Показатели аккумуляции металлов существенно зависят от растения и металла.

Концентрация цинка в побегах изменяется в интервале от 6,0 до 42,7 мг/кг, в корнях кабачка AGB обнаружена наибольшая концентрация цинка, равная 1050 мг/кг, что в 6 раз превышает максимальную концентрацию для остальных растений (24,5÷164,1 мг/кг). Менее всего цинка в побегах аккумулировалось в кукурузе (независимо от сорта), в корнях – кабачка А и кукурузы SN; более всего цинка в побегах трех сортов огурца. Сладкая кукуруза SN аккумулирует в побегах в 1,5 раза больше цинка, чем кукуруза KG; для корней же это отношение равно 2 с превалированием концентрации цинка в кукурузе KG. В данном случае только в кабачке А цинк равномерно распределился между корнями и побегами (ТФ=1).

Концентрация меди в побегах изменяется от величины «ниже предела обнаружения» до 1,1 мг/кг, а в корнях от 3,5 до 15,1 мг/кг. Концентрация меди максимальна в побегах редиса CB и LWI, тыквы MP; в корнях огурца CL и капусты B. Коэффициент транслокации меди в аэрируемые части чрезвычайно низкий (<0,1÷0,2).

Содержание кадмия в побегах кукурузы SN (0,4 мг/кг) меньше, чем в побегах остальных растений (1,1÷3,5 мг/кг), концентрация кадмия в корнях кукурузы SN также минимальна, но не существенно отличается от значений этих величин для других растений, которые находятся в пределах от 5,8 до 21,0 мг/кг. Фактор транслокации кадмия достаточно низкий, но выше, чем для меди.

Хром в побегах не обнаружен, а значения его концентрации в корнях составляют интер-

Таблица 5. Фактор транслокации тяжелых металлов внутри растений

Растения	Zn	Cu	Cd	Ni
Редис FB	0,2	<0,1	0,3	0,6
Редис CB	0,2	0,1	0,3	0,3
Редис LWI	0,1	0,2	0,2	0,2
Редис M	0,3	0,1	0,4	1,1
Огурец BTG	0,3	0,1	0,2	0,7
Огурец P	0,5	<0,1	0,2	0,6
Огурец CL	0,5	<0,1	0,2	0,6
Кабачок A	1,0	0,1	0,1	0,3
Кабачок AGB	0,2	0,1	0,1	0,4
Кабачок Z	0,2	<0,1	0,1	0,4
Кабачок GZ	0,2	<0,1	0,1	0,4
Тыква MP	0,1	0,2	0,1	0,1
Кукуруза SN	0,2	<0,1	0,1	<0,1
Кукуруза KG	0,1	<0,1	0,1	<0,1
Капуста B	0,2	<0,1	0,2	0,4
Капуста F1C	0,2	0,1	0,3	0,5
Салат I2	0,4	0,1	0,3	0,4
Салат AK	0,4	0,1	0,3	0,8

вал от 2 до 15,3 мг/кг. Хром аккумулируется корнями всех культур и сортов, при этом содержание хрома в корнях двух сортов капусты различается в 3 раза, а корни кабачка А аккумулируют в 3 раза меньше хрома, чем остальные три сорта.

Что касается никеля, то он больше всего аккумулируется в побегах всех сортов огурца и капусты, несколько меньше в кабачках. Сорта редиса FB и M аккумулируют довольно большое количество никеля, в то время как оставшиеся два сорта редиса характеризуются наименьшим содержанием никеля в побегах. Никель содержится в побегах от концентраций ниже предела обнаружения до 1,7 мг/кг и от 1,2 мг/кг до 3,5 мг/кг в корнях.

Независимо от культуры и сорта среднее значение транслокационного фактора составляет для никеля 0,45 ± 0,15, для цинка 0,27 ± 0,12, для кадмия 0,21 ± 0,09, для меди 0,11 ± 0,05, для хрома нуль, т. е. по способности к аккумуляции преимущественно в побегах металлы можно расположить в следующий ряд: Ni > Zn > Cd > Cu > Cr.

В определенной степени это связано с концентрацией металлов в растворе (мг/л), которая уменьшается в ряду Zn > Cd > Ni > Cu > Cr. Однако, никель обладает настолько высокой способностью проникать в побеги, что оказывается на первом месте, хотя концентрация цинка превышает содержание никеля в растворе в 20 раз.

Необходимо отметить, что различия в способности аккумулировать тяжелые металлы внутри одного вида довольно распространенное явление, которое обусловлено присущим всем живым организмам внутривидовой изменчивостью, способной проявиться и при техногенном загрязнении природной среды. Это свойство у растений может являться основой генетико-селекционных исследований с целью создания сортов с повышенными защитными возможностями по отношению к избыточным концентрациям тяжелых металлов [13].

Сравнение аккумуляции металлов, добавленных в смеси, с результатами эксперимента с добавлением индивидуальных металлов, приведенных в таблице 6, показало, что при добавлении их в смеси, кадмий аккумулируется в гораздо меньших количествах (в смеси: 1,1÷3,5 мг/кг в побегах и 5,8÷21,0 мг/кг в корнях; при добавлении индивидуальных металлов: 32,0÷95,4 мг/кг в побегах и < 0,5 ÷685,3 мг/кг в корнях). Подобная тенденция характерна и для никеля (в смеси: < 0,5 ÷1,7 мг/кг в побегах и 1,2÷95,4 мг/кг в корнях; при добавлении индивидуальных металлов: < 0,5 ÷ 40,3 мг/кг в побегах и < 0,5 ÷146,6 мг/кг в корнях).

Аналогичный вывод может быть сделан из сопоставления биоконцентрационных факторов (таблица 7). Так, для никеля и кадмия, добавленных в смеси, БКФ изменяется в интервале 1÷6, для индивидуальных металлов в интервале 36÷524 для никеля и 310÷1371 для кадмия. Таким образом, смесь металлов растениями аккумулируется в меньшей степени, чем отдельные металлы. При этом меньшие концентрации накопленных металлов оказывают более выраженное токсическое воздействие на растения.

В таблице 8 приведены результаты расчета соотношения концентраций тяжелых металлов в сырой биомассе растений и значений предельно-допустимых концентраций в продуктах питания (ПДКп.п.) и максимально допустимым уровнем их содержания в корме скота (МДУ). В таблице фоном выделены растения, обеспечивающие допустимый минимальный объем биомассы при произрастании в средах, загрязненных тяжелыми металлами, т. е. ИТБ которых ≥ 50%.

Таблица 6. Концентрация тяжелых металлов в побегах, мг Me / кг сухой массы

Растения	Побеги		Корни	
	Cd	Ni	Cd	Ni
Кукуруза SN	100,1	<0,5	319,9	100,7
Кукуруза KG	93,1	<0,5	269,6	73,1
Тыква MP	36,2	18,3	554,5	6,2
Капуста F1C	77,9	40,3	<0,5	<0,5
Капуста B	45,0	19,8	155,1	122,1
Кабачок Z	32,0	19,3	<0,5	10,1
Кабачок AGB	61,7	24,3	685,3	146,6

Таблица 7. Биоконцентрационный фактор при добавлении тяжелых металлов индивидуально и в смеси

Растения	Добавление металла	Металлы				
		Zn	Cu	Cd	Ni	Cr
Кукуруза SN	Инд.	-	-	640	360	-
	Смесь	6	41	11	9	43
Кукуруза KG	Инд.	-	-	539	261	-
	Смесь	15	32	15	7	38
Тыква MP	Инд.	-	-	1109	-	-
	Смесь	74	66	24	8	57
Капуста B	Инд.	-	-	310	436	-
	Смесь	27	137	28	12	191
Капуста F1C	Инд.	-	-	-	-	-
	Смесь	19	70	12	9	67
Кабачок Z	Инд.	-	-	-	36	-
	Смесь	22	101	32	11	137
Кабачок AGB	Инд.	-	-	1371	524	-
	Смесь	17	84	22	7	112

Таблица 8. Соотношение концентраций тяжелых металлов в сырой биомассе с МДУ их содержания в корме скота [14] и с ПДК в пище человека [15]

Растения	Zn		Cu		Cd		Ni		Cr	
	МДУ	ПДКп.п.	МДУ	ПДКп.п.	МДУ	ПДКп.п.	МДУ	ПДКп.п.	МДУ	ПДКп.п.
Огурец P	0,03	0,17	0,001	0,003	0,50	5,0	0,02	0,14	0,05*	0,13*
Огурец BTG	0,04	0,21	0,001	0,004	0,57	5,7	0,03	0,18	0,05*	0,13*
Огурец CL	0,04	0,22	0,001	0,002	0,60	6,0	0,02	0,14	0,05*	0,13*
Кабачок A	0,03	0,17	0,001	0,003	0,47	4,7	0,03	0,16	0,07*	0,18*
Кабачок AGB	0,03	0,15	0,002	0,005	0,30	3,0	0,02	0,12	0,07*	0,18*
Кабачок Z	0,04	0,18	0,001	0,003	0,47	4,7	0,03	0,18	0,07*	0,18*
Кабачок GZ	0,03	0,17	0,001	0,002	0,37	3,7	0,02	0,1	0,07*	0,18*
Тыква MP	0,08	0,41	0,004	0,011	0,43	4,3	0,01	0,06	0,1*	0,25*
Кукуруза SN	0,02	0,11	0,001*	0,004*	0,17	1,7	0,12*	0,02*	0,07*	0,18*
Кукуруза KG	0,01	0,07	0,001*	0,004*	0,43	4,3	0,12*	0,02*	0,07*	0,18*
Капуста B	0,06	0,31	0,002*	0,005*	0,93	9,3	0,04	0,26	0,1*	0,25*
Капуста F1C	0,04	0,22	0,001	0,004	0,77	7,7	0,04	0,24	0,1*	0,25*
Салат I2	0,02	0,11	0,001	0,003	0,27	2,7	0,01	0,08	0,05*	0,13*
Салат AK	0,02	0,11	0,001	0,002	0,43	4,3	0,02	0,14	0,05*	0,13*
Редис FB	0,05	0,47	0,02	0,05	1,50	15,0	0,04	0,24	0,38	0,95
Редис CB	0,07	0,69	0,02	0,07	1,80	18,0	0,05	0,28	0,94	2,35
Редис LWI	0,06	0,60	0,02	0,05	1,70	17,0	0,03	0,20	0,54	1,35
Редис M	0,05	0,49	0,02	0,05	1,53	15,3	0,03	0,18	0,82	2,05

* – рассчитаны по значению предела обнаружения (0,5 мг / кг сухой массы)

Концентрации тяжелых металлов в растениях не превышали значений МДУ (кроме редиса). Таким образом, можно сделать вывод о возможности использования кабачка AGB и Z, обоих сортов сладкой кукурузы и капусты F1C для фиторемедиационной очистки сточных вод. Редис FB характеризуется чрезвычайно низкой биомассой корней, что ограничивает его возможности для фиторемедиации.

Все вышеперечисленные растения не относятся к категории гипераккумуляторов. Однако с точки зрения последующего применения биомассы на корм скоту, это является преимуществом, а не недостатком, т. к. позволяет им накапливать тяжелые металлы в количествах, не превышающих допустимых уровней.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. При исследовании фиторемедиационных характеристик растений, выращиваемых в растворах, содержащих смесь тяжелых металлов, установлено, что способность растений к аккумуляции металлов существенно ниже, чем для индивидуальных металлов, т. е. металлы являются антагонистами по отношению друг к другу. При этом смесь металлов оказывается более токсичной для растений, чем индивидуальные металлы, т. е. наблюдается синергизм их токсического действия.

2. Установлена возможность использования кабачка AGB и Z, кукурузы SN и KG, капусты F1C для выращивания биомассы на сточных водах, содержащих смесь тяжелых металлов.

Список литературы:

1. Убугунов, В.Л., Кашин, В.К. Тяжелые металлы в садово-огородных почвах и растениях г. Улан-Удэ / В.Л. Убугунов, В.К. Кашин. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2004. – 128 с.
2. Каббата-Пендиас, А., Пендиас, Х. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Каббата-Пендиас, Х. Пендиас. М.: Мир, 1989. – 498 с.
3. Минеев, В.Г. Экологические проблемы агрохимии / В.Г. Минеев. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. – 283 с.
4. Ильин, В.Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение / Новосибирск: Наука, 1991. – 151 с.
5. Алексеев, Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях / Ю.В. Алексеев. – Л.: Агропромиздат, 1987. – 142 с.
6. Watson, C., Pulford, I.D., Riddel-Black, D. Development of a hydroponic screening technique to assess heavy metal resistance in willow (Salix) / C. Watson, I.D. Pulford, D. Riddel-Black // International journal of phytoremediation. – 2003. – V.5. – №4. – P. 333-349.
7. Николаева М.Г., Паутова И.А. Краткий словарь русских названий растений СПб: изд-во ООО “Росток”, 2002. – 80 с.
8. Shahandeh, H., Hossner, L.R. Plant screening for chromium phytoremediation / H. Shahandeh, L.R. Hossner // International journal of phytoremediation. – 2000. – V.2. – №1. – P. 31-51.
9. Ali, N. A., Berna, M. P., Ater, M. Tolerance and bioaccumulation of cadmium by Phragmites australis grown in the presence of elevated concentrations of cadmium, copper, and zinc / N. A. Ali, M. P. Berna, M. Ater // Aquatic Botany. – 2004. – V. 80. – P.163–176.
10. Квеситадзе, Г.И. Метаболизм антропогенных токсикантов в высших растениях / Г.И. Квеситадзе, Г.А. Хатисашвили, Т.А. Садунишвили, З.Г. Евстигнеева. – М.: Наука, 2005. – 199 с.
11. Гончарова, Н. В. Фиторемедиация: новая стратегия использования растений для очистки почвенного покрова / Н. В. Гончарова // Экологический вестник. – 2010. – №4 (14). – С.5-14.
12. Сапожникова, Е.Н. Разработка методов снижения экологической опасности гальванических производств на основе реагентных, адсорбционных и фиторемедиационных технологий очистки воды от ионов тяжелых металлов: дис.... канд. техн. наук: 03.00.16 / Сапожникова Елена Николаевна. – Уфа, 2006. – 187 с.
13. Титов, А. Ф., Таланова, В. В., Казнина, Н. М. Физиологические основы устойчивости растений к тяжелым металлам: учебное пособие / А.Ф. Титов, В.В. Таланова, Н.М. Казнина. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2011. – 77 с.
14. Черников, В.А., Алексахин, В.М., Голубев, А.В. и др. Агроэкология / В.А. Черников, В.М. Алексахин, А.В. Голубев и др. – М.: Колос, 2000. – 536 с.
15. СанПиН 2.1.7.573-96 «Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения».

Сведения об авторах

Елизарьева Елена Николаевна, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и охраны окружающей среды Башкирского государственного университета, кандидат технических наук
E-mail: elizareva_en@mail.ru

Янбаев Юлай Аглямович, профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности и охраны окружающей среды, проректор по учебной работе Башкирского государственного университета, доктор биологических наук, профессор
E-mail: yanbaev_ua@mail.ru

Кулагин Алексей Юрьевич, заведующий лабораторией лесоведения Уфимского Института биологии РАН, доктор биологических наук, профессор
E-mail: coolagin@list.ru