

Влияние буферности псаммозема гумусового, агрозема аккумулятивно-карбонатного и агрокоричневой почвы на транслокацию кадмия в кресс-салат

В. Л. УБУГУНОВ, М. Д. ДАШИЕВА

Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
E-mail: ubugunovv@mail.ru, marina-dash@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Определена буферная способность псаммозема гумусового, агрозема аккумулятивно-карбонатного и агрокоричневой почвы по отношению к кадмию. Изучено влияние буферности почв на динамику высоты, биологическую продуктивность и уровень накопления кадмия в биомассе кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) при возрастающих дозах металла. Выявлена способность кресс-салата накапливать высокие количества кадмия, многократно превышающие допустимые санитарно-гигиенические нормативы уже при низких концентрациях элемента в почвах.

Ключевые слова: буферность почвы, кадмий, кресс-салат.

Почва как особый компонент биосферы выступает в роли природного аккумулятора и буфера, контролирующего перенос химических элементов и соединений в атмо- и гидросферу и живое вещество. Продолжительность пребывания тяжелых металлов, в том числе кадмия, в почвах исчисляется десятками и сотнями лет [1, 2]. Антропогенно поступающие металлы в результате физико-химических реакций с почвенными компонентами на определенное время выключаются из биогеохимического круговорота, что при высоком уровне загрязнения имеет положительный экологический и санитарно-гигиенический эффект.

Поглощение кадмия различными культурами в зависимости от его концентрации в почвах и питательных растворах изучалось

многими исследователями в России и за рубежом [3–10].

Несмотря на большое количество работ, проведенных по проблеме транслокации кадмия из почв в растения, данный вопрос еще далек от окончательного разрешения. Это обусловлено многообразием климатических условий, вариабельностью физико-химических свойств почв, внутри- и межвидовой спецификой растений, использованных в опытах, разнообразием методик и способов проведения исследований и интерпретации результатов, что значительно осложняет сопоставимость полученных данных и применимость их в межрегиональном масштабе.

Как показывает анализ литературы, транслокация кадмия в растения из одного и того же типа почв весьма различна в зависимости от их pH, гранулометрического состава, содержания гумуса, карбонатов, полуторных

Убугунов Василий Леонидович
Дашиева Марина Дашинамаевна

оксидов, степени окультуренности и т. д. [4, 6, 8, 11–15]. Из этих параметров складывается способность почв сохранять свои основные агроэкологические функции и снижать токсичность металлов. Запас прочности буферной системы почв имеет определенные пределы, которые могут весьма существенно различаться в зависимости от их свойств, условий развития и функционирования.

Цель исследования – изучение транслкации кадмия в кресс-салат (*Lepidium sativum* L.) из почв, сформированных в различных экологических условиях Западного Забайкалья.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследовали агрозем аккумулятивно-карбонатный, агрокоричневую почву и псаммозем гумусовый. Первые два типа составляют основной фонд пахотных почв в Западном Забайкалье. Псаммозем гумусовый в регионе распространен в основном под лесными массивами, преимущественно сосняками. Данный почвенный тип, практически не использующийся в сельскохозяйственном производстве в связи с крайне низким плодородием, взят для сравнения, так как имеет низкую устойчивость по отношению к загрязнению тяжелыми металлами.

Изученные почвы имели разные физико-химические свойства (табл. 1) и количества кадмия в профиле (рис. 1).

Для проведения эксперимента в степных и лесостепных районах Западного Забайкалья агрозем аккумулятивно-карбонатный и агрокаштановую почву отобрали с пахотных угодий, а псаммозем гумусовый – в лесном массиве путем снятия верхнего 0–20 см слоя. Отобранные почвы поместили в вегетационные сосуды емкостью 20 л, с площадью дневной поверхности 0,1 м² и глубиной – 25 см. В сосуды с каждым типом почв внесли кадмий в виде водного раствора уксуснокислой соли из расчета, мг/кг: 1) 0 (контроль); 2) 1; 3) 2; 4) 4; 5) 8; 6) 16; 7) 32 и 8) 64. После внесения кадмия провели инкубацию почв в течение 30 сут. После инкубации в вегетационные сосуды выселили семена кресс-салата. На 10-е и 25-е сут после всходов измерили высоту растений. В течение вегетации в опытных сосудах поддерживали оптимальную влажность на уровне 60 % ППВ и проводили другие необходимые агротехнические мероприятия (рыхление, прополку и др.). По окончании эксперимента взвесили биомассу отдельно надземной части и корней. Опыт провели в 4-кратной повторности.

Для изучения морфологии и физико-химических свойств почв, а также характера

Т а б л и ц а 1

Физико-химические свойства почв

Тип почвы	Горизонт	Слой, см	pH _{водн}	Гумус, %	ЕКО, мг-экв./100 г почвы	Содержание, %	
						частиц <0,01 мм	карбонатов
Псаммозем гумусовый	Wel	0–12	6,5	0,46	10,6	3,8	–
	C ^h [hh]	12–20	6,2	0,35	6,4	5,7	–
	2C ^h	20–35	6,3	–	8,0	Н.о.	–
	3C ^h	35–70	6,3	–	6,3	»	–
Агрозем аккумулятивно-карбонатный	P	0–30	6,7	1,47	18,3	15,1	1,50
	ВМК	30–40	6,9	0,94	12,7	Н.о.	–
	ВМ	40–60	7,2	–	16,1	»	–
Агрокоричневая абра- дированная, темно- языковатая красно- профильная	САТdc	60–100	7,5	–	22,2	»	4,87
	Ppb	0–25	7,5	2,37	20,0	17,60	0,85
	ВМуy	25–32	7,4	1,37	18,8	Н.о.	0,85
профильная	BCAdc, ro	32–53	7,7	–	18,4	»	13,23
	C _{Ca}	53–73	7,4	–	18,3	»	7,89

П р и м е ч а н и е. Н.о. – не определяли.

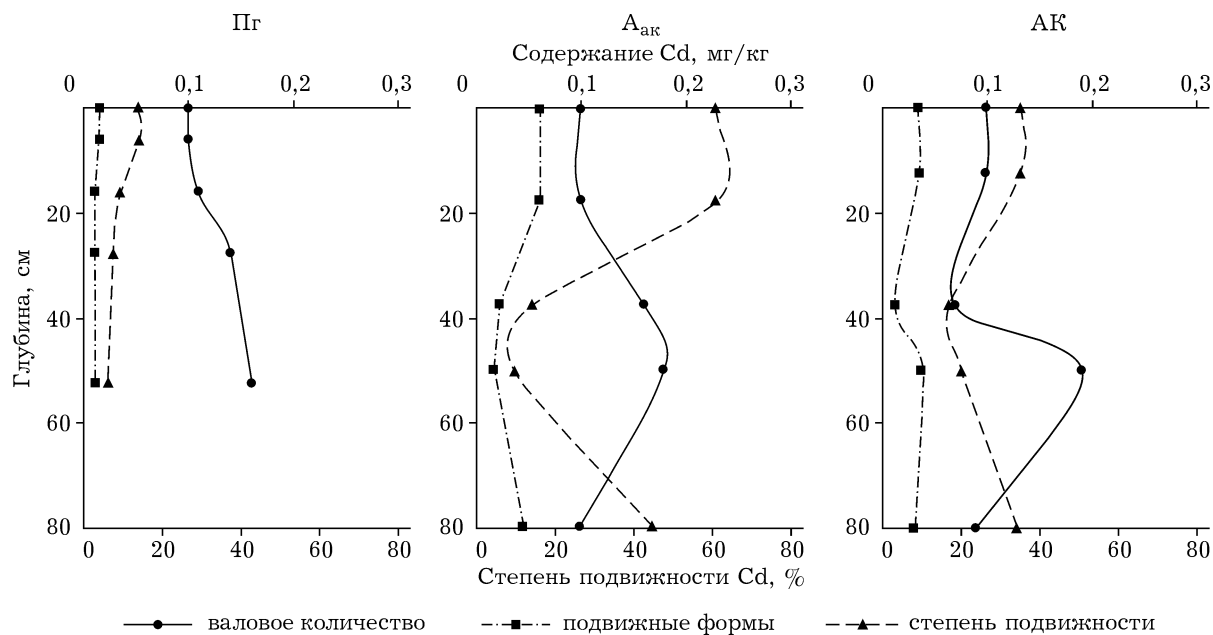


Рис. 1. Профильное распределение валового и подвижного кадмия в почвах. Здесь и в рис. 2–5: Пг – псаммозем гумусовый; А_{ак} – агрозем аккумулятивно-карбонатный; АК – агрокоричневая

профильного распределения кадмия в естественных условиях в местах отбора заложили почвенные разрезы. Для определения буферной способности почв определили рН среды, содержание гумуса, карбонатов, ЕКО и физической глины.

При изучении гранулометрического состава и физико-химических свойств почвы руководствовались общепринятыми методами исследований [16–18]: рН водной вытяжки определяли потенциометрическим методом, содержание гумуса – по методу Тюрина в модификации Никитина, емкость катионного обмена – по методу Бобко – Аскинази, гранулометрический состав – методом пипеток, количество карбонатов – при помощи кальциметра по Ринькису.

Для определения валового содержания кадмия в почве пробы подвергались полному разложению концентрированными кислотами. Подвижная форма кадмия вытеснялась ацетатно-аммонийным буфером (ААБ) с рН 4,8. Валовое содержание и подвижную форму элемента в почвах, а также его концентрацию в растительных пробах после их озоления при 450 °С и последующего растворения в разбавленной соляной кислоте [19] определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре “Квант-2а” с дейтериевой коррекцией фона.

Буферность почвы по отношению к тяжелым металлам оценивали согласно градации, разработанной В. Б. Ильиным [20]. Вариационно-статистическую обработку полученных данных производили по Б. А. Доспехову [21] с использованием программы Microsoft Excel 2000.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Буферность почв по отношению к тяжелым металлам является интегральным показателем совокупности физико-химических свойств почв, снижающих подвижность металлов. Оценка буферности почв в эксперименте показала, что наиболее устойчивой, согласно градации В. Б. Ильина [20], была агрокоричневая почва (32 балла), наименее – псаммозем гумусовый (13,5 балла), а агрозем аккумулятивно-карбонатный занимал промежуточное положение (21,5 балла) (рис. 2). Преимущественный вклад в буферность этих почв вносили рН среды, содержание тонкодисперсной фракции и карбонатов. Влияние содержания гумуса и полуторных оксидов оказалось несущественным, особенно в псаммоземе гумусовом и агроземе аккумулятивно-карбонатном.

С течением времени в почве происходит закрепление подвижных соединений метал-

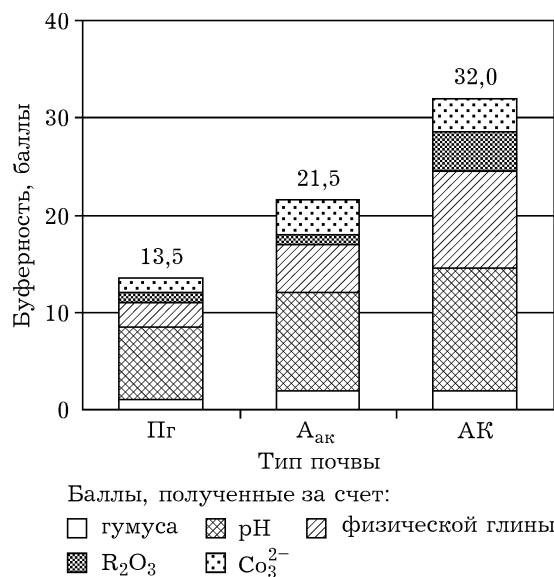


Рис. 2. Буферность почв по отношению к тяжелым металлам

лов, что вызывает увеличение толерантных концентраций, подтвержденное сравнением результатов опытов, проводимых длительное время [6]. В работе С. В. Лукина и др. [22] при дозе 6 мг Cd/кг почвы в черноземе типичном тяжелосуглинистом с $pH_{\text{сол}} 5,8$ определено снижение подвижности кадмия до 36,4 % от валового содержания. В нашем исследовании содержание кадмия в почве, извлекаемого ААБ с $pH 4,8$, также снизилось во всех почвах (рис. 3). Однако, несмотря на различную буферность, уменьшение количества

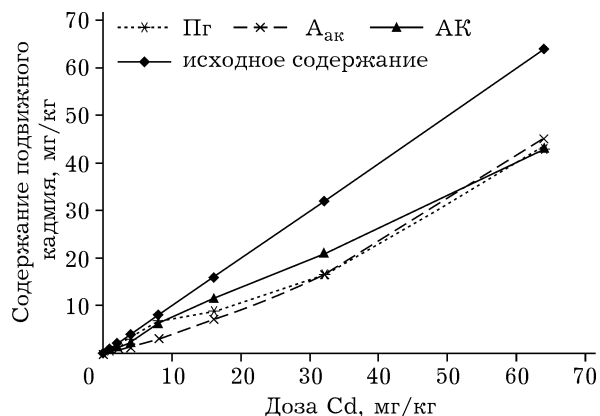


Рис. 3. Содержание подвижного кадмия в псаммоземе гумусовом, агроземе аккумулятивно-карбонатном и агрокоричневой почве через 2 года после внесения кадмия

подвижной формы металла во всех почвах было сходным.

Возрастающие дозы кадмия угнетали рост и биопродуктивность кресс-салата на всех типах почв (рис. 4, табл. 2). Угнетения роста кресс-салата не отмечено в начальные периоды роста (10 сут вегетации): высота растений на всех вариантах варьировала в небольшом интервале (2,0–4,3 см на псаммоземе гумусовом, 4,3–5,2 см – на агроземе аккумулятивно-карбонатном и агрокоричневой почве). В этот период тип почвы и возрастающие дозы кадмия не оказали заметного влияния на высоту растений за исключением варианта с максимальной концентрацией

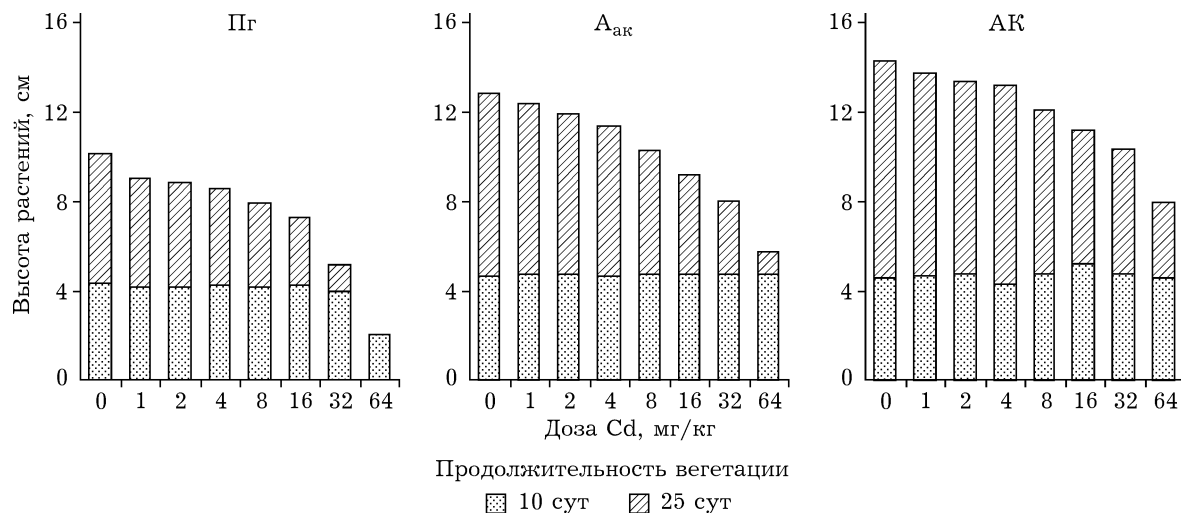


Рис. 4. Динамика высоты растений кресс-салата в зависимости от типа почв и возрастающих доз кадмия

Т а б л и ц а 2

Влияние возрастающих доз кадмия на биологическую продуктивность кресс-салата

Доза Cd, мг/кг	Зеленая масса		Корни		Биологическая продуктивность	
	г/сосуд	% от контроля	г/сосуд	% от контроля	г/сосуд	% от контроля
<i>Псаммозем гумусовый</i>						
0	15,3	–	1,3	–	16,6	–
1	14,2	93	1,2	92	15,4	93
2	13,3	87	1,1	85	14,4	87
4	12,3	80	1,0	77	13,3	80
8	11,1	73	0,9	69	12,0	72
16	10,7	70	0,8	62	11,5	69
32	8,0	52	0,7	50	8,7	52
64	Растения погибли через 10 сут после всходов					
НСР _{0,05}	1,4		0,07		1,8	
<i>Агрозем аккумулятивно-карбонатный</i>						
0	29,3	–	2,6	–	31,9	–
1	27,7	95	2,4	93	30,1	94
2	25,8	88	2,3	90	28,1	88
4	22,9	78	2,0	77	24,9	78
8	20,2	69	1,7	67	21,9	69
16	16,7	57	1,5	56	18,2	57
32	12,7	43	1,1	42	13,8	43
64	8,9	30	0,6	23	9,5	30
НСР _{0,05}	3,1		0,3		3,3	
<i>Агрокориичневая почва</i>						
0	33,8	–	2,9	–	36,7	–
1	30,5	90	2,8	98	33,3	91
2	30,3	85	2,7	94	31,4	86
4	27,5	81	2,4	85	29,9	82
8	24,7	73	2,2	78	26,9	73
16	22,8	67	1,9	67	24,7	67
32	20,2	60	1,6	55	21,8	59
64	17,8	53	1,2	40	19,0	52
НСР _{0,05}	2,4		0,3		2,8	

элемента (64 мг/кг) на псаммоземе гумусовом. Очевидно, это связано с питанием кресс-салата за счет запасных веществ, содержащихся в семени, с пока еще слабым развитием корневой системы и, следовательно, низким уровнем поглощения металла из почвы. Но к концу вегетации высота растений на разных типах почв существенно различалась. Наибольшую прибавку в росте в период 10–25 сут вегетации дали растения, произраставшие на агрокориичневой почве, несколько меньшую – на агрозем аккумуля-

тивно-карбонатном и наименьшую – на псаммоземе гумусовом.

Угнетение корней и надземной части при возрастании концентраций кадмия в почве было одинаковым. Некоторым исключением стала максимальная доза (64 мг/кг), при которой отмечено большее снижение массы корней по сравнению с надземной частью.

Градации почв по высоте и биопродуктивности произрастающего на них кресс-салата соответствовала группировке этих почв по буферности к тяжелым металлам.

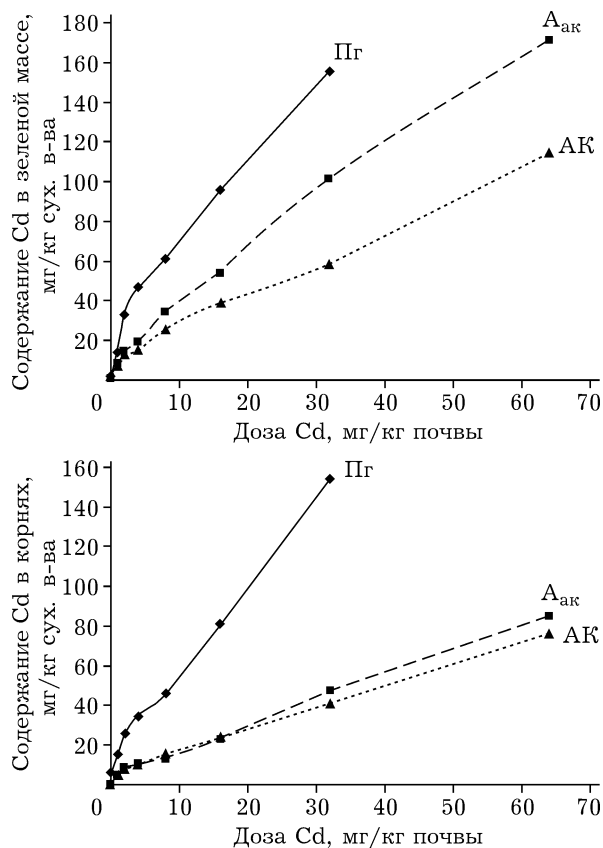


Рис. 5. Накопление кадмия зеленой массой и корнями кресс-салата в зависимости от типа почвы и возрастающих доз кадмия

Загрязнение почв кадмием оказало влияние как на темпы роста и продуктивность кресс-салата, так и на увеличение накопления металла растениями в концентрациях, опасных для здоровья человека и животных. Проведенными исследованиями определены уровни поступления кадмия в корни и зеленую массу кресс-салата при внесении возрастающих доз металла (рис. 5).

Аккумуляция кадмия кресс-салатом имела прямой характер и с достаточно высокой степенью вероятности описывалась линейными уравнениями (табл. 3). Корреляционная связь между концентрациями кадмия в почвах и растениях была очень высокой, а значения r в зависимости от типа почв и вегетативных частей растений, взятых для расчетов, колебались в интервале 0,983–0,997.

Следует отметить, что линейный характер транслокации кадмия из почвы в растения хорошо заметен только при относительно высоких концентрациях металла, составивших в зависимости от типа почвы 4–8 мг/кг и более. При меньших концентрациях эта зависимость была не столь однозначной. По нашим наблюдениям и согласно анализу приведенных в литературе данных, при относительно низких концентрациях поглощение металла растениями чаще близко к линейному в тех случаях, когда почвы имеют либо очень низкую, либо очень высокую буферность. В остальных случаях кривые зависимости чаще описываются нелинейными уравнениями. Однако эти предположения требуют дополнительной проверки.

Кресс-салат, как показали исследования, является культурой-концентратором кадмия, способной накапливать в своих тканях более 170 мг/кг сухого вещества. Содержание металла в съедобной части растений (зеленой массе) превысило ПДК_{пр} для овощей, равную 0,03 мг/кг сырого вещества, уже на контрольных вариантах (табл. 4), хотя при этом ПДК кадмия в почвах не превышалась.

Т а б л и ц а 3

Корреляционная связь между возрастающими дозами кадмия и накоплением его растениями кресс-салата

Тип почвы	Вегетативная часть растения	Коэффициент корреляции	Уравнение регрессии*
Псаммозем гумусовый	Зеленая масса	0,983	$y = 4,4998x + 17,586$
	Корневая масса	0,992	$y = 4,4273x + 12,190$
Агрозем аккумулятивно-карбонатный	Зеленая масса	0,996	$y = 2,6182x + 8,6312$
	Корневая масса	0,996	$y = 1,2792x + 4,1270$
Агрокоричневая	Зеленая масса	0,995	$y = 1,6733x + 7,4089$
	Корневая масса	0,997	$y = 1,1253x + 4,5355$

П р и м е ч а н и е. y – содержание кадмия в растениях, мг/кг сухого вещества, x – доза кадмия, мг/кг почвы.

Превышение ПДК_{пр} кадмия в зеленой массе кресс-салата

Доза Cd, мг/кг почвы	Тип почвы		
	псаммозем гумусовый	агрозем аккумулятивно-карбонатный	агрокориичневая
0	13	6	7
1	98	48	51
2	227	80	82
4	285	101	96
8	340	175	152
16	507	255	246
32	735	390	357
64	–	683	590

П р и м е ч а н и е. Цифры показывают кратное превышение ПДК_{пр} кадмия для овощных культур; прочерк – растения погибли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По буферности к тяжелым металлам почвы можно расположить в следующий ряд: псаммозем гумусовый < агрозем аккумулятивно-карбонатный < агрокориичневая. Наиболее важными факторами буферности для изученных почв оказались рН среды, содержание тонкодисперсной фракции и карбонатов.

Наиболее устойчивые к загрязнению почвы благодаря буферным свойствам снижали токсичное действие кадмия, создавая тем самым более благоприятные условия для роста и накопления биомассы растений. Транслокация кадмия в надземную и корневую части кресс-салата прямо пропорционально зависела от концентрации металла в изученных типах почв и с высокой степенью вероятности описывалась линейными уравнениями.

Согласно результатам исследования, кресс-салат является концентратором кадмия и способен накапливать в своих тканях более 170 мг/кг сухого вещества. Содержание металла в зеленой массе превысило ПДК_{пр} на контрольных вариантах всех типов почв.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта СО РАН “Разработка системы комплексной индикации процессов опустынивания для оценки современного состояния экосистем Сибири и Центральной Азии, создание на ее основе прогнозных моделей и системы мониторинга” и программы “Биологическое разнообразие”, проект № 23-11 “Инвентаризация разнообразия сообществ и экосистем Байкальского региона (2009–2010 гг.)”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
2. Чернова О. В., Груздков Д. Ю. Изменения валового содержания микроэлементов в почвах Европейской территории России в зависимости от их гранулометрического состава // Доклады по экологическому почвоведению. 2006. № 1. Вып. 1. С. 132–151.
3. Jarvis S. C., Jones L. H. P., Hopper M. J. Cadmium uptake from solution by plants and its transport from roots to shoots // Plant and Soil. 1976. N 44. P. 179–191.
4. Van Erp P. J., Van Lune P. A new method for determining the between soil- and plant-cadmium // Ibid. 1989. N 116. P. 119–122.
5. Гармаш Н. Ю. Влияние тяжелых металлов на величину и качество урожая сельскохозяйственных культур: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 1986. 18 с.
6. Лебедева Л. А., Лебедев С. Н., Едемская Н. Л., Графская Г. А. Влияние известкования и органических удобрений на содержание кадмия в растениях // Агрохимия. 1997. № 10. С. 45–51.
7. Дабахов М. В., Соловьев Г. А., Егоров В. С. Влияние агрохимических средств на подвижность свинца и кадмия в светло-серой лесной почве и поступление их в растения // Там же. 1998. № 8. С. 54–59.
8. Потатуева Ю. А., Русаков Н. В., Прищеп Е. Г., Сидоренкова Н. К., Леонидова Т. В., Григорьева Т. И. Влияние кадмия на урожай сельскохозяйственных культур и накопление этого элемента в почвах и растениях // Там же. 1998. № 3. С. 53–61.
9. Степанок В. В. Влияние соединений кадмия на урожай и элементный состав сельскохозяйственных культур // Там же. 1998. № 6. С. 74–79.
10. Ingwersen J., Streck T. A regional-scale study on the crop uptake of cadmium from sandy soils: measurement and modeling // J. Environ. Qual. 2005. N 34. P. 1026–1035.
11. Головатый С. Е., Жигарев П. Ф., Панкрутская Л. И. Поступление кадмия в сельскохозяйственные растения // Агрохимия. 2000. № 1. С. 81–85.

12. Алексеев Ю. В. Тяжелые металлы в почвах и растениях Л.: Агропромиздат, 1987. 142 с.
13. Тяжелые металлы в системе почва – растение – удобрение. М.: Изд-во “Пролетарский светоч”, 1997. 290 с.
14. Ильин В. Б., Сысо А. И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
15. Ягодин Б. А., Виноградова С. Б., Говорин В. В. Кадмий в системе почва – удобрения – растения – животные организмы и человек // *Агрохимия*. 1989. № 5. С. 118–130.
16. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
17. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
18. Ринькис Г. Я., Рамане Х. К., Куницкая Т. А. Методы анализа почв и растений. Рига: Зинатне, 1987. 174 с.
19. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв при контроле загрязнения окружающей среды металлами. М.: Метеоиздат, 1982. 109 с.
20. Ильин В. Б. Оценка буферности почв по отношению к тяжелым металлам // *Агрохимия*. 1995. № 10. С. 109–113.
21. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Колос, 1979. 416 с.
22. Лукин С. В., Явтушенко В. Е., Солдат И. Е. Накопление кадмия в сельскохозяйственных культурах в зависимости от уровня загрязнения почвы // *Агрохимия*. 2000. № 2. С. 73–77.

Effect of the Buffer Capacity of Humic Psammozem, Accumulative Carbonate Agrozem and Agrobrown Soil on Cadmium Translocation into Watercress

V. L. UBUGUNOV, M. D. DASHIEVA

*Institute of General and Experimental Biology SB RAS
670047, Ulan-Ude, Sakhyanova str., 6
E-mail: ubugunovv@mail.ru, marina-dash@mail.ru*

Buffer capacity of humic psammozem, accumulative carbonate agrozem and agrobrown soil with respect to cadmium was determined. The effect of soil buffer capacity on the dynamics of the height, biological productivity and the level of cadmium accumulation in the biomass of watercress (*Lepidium sativum* L.) under increasing metal doses was investigated. The ability of watercress to accumulate large amounts of cadmium exceeding the admissible sanitary-gygienic standards even at low concentrations of the element in the soil was established.

Key words: soil buffer capacity, cadmium, watercress.