



ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЙ ЭКОГЕОХИМИЧЕСКОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ПОЧВ (ТЭРП), ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ (ТМ)

Ю. Г. БАЙКЕНОВА,

старший преподаватель,

Ю. Л. БАЙКИН,

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой,

Уральский государственный аграрный университет

(620075, г. Екатеринбург, ул. К. Либкнехта, д. 42; тел.: 8 (343) 371-33-63)

Ключевые слова: почвы, тяжелые металлы, загрязнение почв, экогеохимическая рекультивация почв, урожай, предельно допустимая концентрация.

Изучались приемы рекультивации почв разного таксономического уровня, загрязненных ТМ. В опытах моделировали высокий уровень загрязнения почв комплексом тяжелых металлов (Zn; Cu; Pb; Cd). Особенности изучаемых технологий экогеохимической рекультивации почв (ТЭРП), заключаются в том, что они направлены на усиление естественных геохимических барьеров почвы. Изучали две технологии: ТЭРП-1 — в качестве рекультиванта в почву вносили диатомит в количестве 1 % от массы почвы; ТЭРП-2 — суперфосфат в дозе 500 мг/кг почвы. В качестве тестовых культур выращивали ячмень, кукурузу и пшеницу. Результаты исследований показали, что наиболее токсичное действие загрязнения ТМ проявилось на малогумусных дерново-подзолистой и серой лесной почвах. В первый год исследований на этих почвах растения без рекультивации погибли. Из изучаемых технологий более эффективным оказалось внесение сорбента. На черноземных почвах эффективность обеих технологий была практически одинакова. Содержание подвижных форм всех ТМ в первый год в малогумусных почвах превышало ПДК в 9–5 раз. В черноземных почвах количество подвижных форм ТМ было в 1,5–2 раза ниже. В последующие годы, их содержание в почве снизилось за счет выноса этих элементов растениями и связывания почвенным поглощающим комплексом. При этом сохраняются преимущественно черноземных почв. Однако, несмотря на значительное снижение количества, концентрации ТМ по-прежнему превышают предельно допустимые значения. Рекультиванты снижают содержание подвижных ТМ в почвах, но их количество остается высоким и превышает ПДК. Высокий уровень загрязнения почв ТМ способствовал поступлению их в растения и накоплению в недопустимых количествах. Высокие защитные свойства черноземных почв и применяемые технологии обеспечили получение продукции с более низкой концентрацией ТМ, но и в ней содержание токсикантов превышало ПДК.

EFFICIENCY TECHNOLOGIES ENVIRONMENTAL AND GEOCHEMICAL SOIL RECLAMATION (ETSR), CONTAMINATED WITH HEAVY METALS (HM)

YU. G. BAIKENOVA,

senior lecturer,

YU. L. BAYKIN,

candidate of agricultural sciences, associate professor, head of department, Ural State Agricultural University

(42 K. Libknehta Str., 620075, Ekaterinburg; tel: +7 (343) 371-33-63)

Keywords: soil, heavy metals, pollution of soils, ecogeochemical reclamation of soils, crops, the maximum permissible concentration.

The reclamation methods of soils of different taxonomics contaminated with heavy metals (HM) were studied. In the experiments the high level of heavy metals (Zn; Cu; Pb; Cd) soil pollution was simulated. Article features of the studied ecogeochemical technologies of soil reclamation (ETSR), lies in the fact that they are aimed at strengthening the natural soil geochemical barriers. We studied two technologies: ETSR-1 — diatomite was added to the soil in an amount of 1 % by weight of the soil as reclamation; ETSR-2 — superphosphate in dose 500 mg/kg of soil. As test crops barley, corn and wheat were grown. The results showed that the most toxic effects of HM pollution were showed on humus-poor sod-podzolic and gray forest soils. In the first year of studies the plants without soil reclamation died. The introduction of the sorbent was more effective than other tested technologies. On chernozemic soils efficiency of both technologies was practically identical. In the first year the content of mobile forms of HM in low-humus soils exceeded the MPC in 9–15 times. In chernozemic soils the quantity of HM mobile forms was 1.5–2 times lower. In subsequent years, their content in the soil decreased by the removal of these elements by plants and soil absorption complex binding. At the same time, the chernozemic soils had kept the advantages. However, despite the significant reduction in HM concentrations still exceeds the MPC. Reclamation reduce the amount of mobile heavy metals forms in soils, but their remaining quantity is high and exceeds the MPC. The high level of soil contamination with HM promoted their entering into plants and accumulates in harmful amounts. High protective properties of chernozemic soil and applied technologies provided the product with a lower concentration of HM, but their quantity exceeded the maximum permissible concentration of toxicants.

Положительная рецензия представлена Н. Н. Зезиным, доктором сельскохозяйственных наук, директором Уральского научно-исследовательского института сельского хозяйства.



Природные комплексы Уральского региона, особенно в местах сосредоточения металлургических и горнодобывающих предприятий испытывают колоссальную антропогенную нагрузку, заключающуюся в загрязнении окружающих территорий промышленными выбросами, в том числе и тяжелыми металлами (ТМ).

Попадая в почву, ТМ вовлекаются в природные процессы круговорота химических элементов и подвергаются различным превращениям. Установлено, что судьба многих элементов, поступивших на поверхность почвы, зависит от ее физических и химических свойств. В одних случаях многие элементы повышают свою активность, в других — трансформируются в малоактивные, безопасные для сельскохозяйственных культур соединения. Поэтому, некоторая часть ТМ выносятся из почвы с урожаем, часть, более или менее прочно, связывается почвенным поглощающим комплексом, часть вымывается из почвы, попадает в грунтовые воды и водоемы, расширяя, таким образом, ареал загрязнения [1, 2, 8].

Известно, что на подвижность ТМ в почве и поступление их в растения влияет реакция среды (рН), количество и качество органического вещества, емкость катионного обмена, количество тонкодисперсной минеральной части, наличие карбонатов и т. д. Так, например, многие элементы (Cu, Pb, Cd, Ni) в кислой среде становятся подвижными и накапливаются в растениях, причем растения могут содержать опасные для человека и животных количества тяжелых металлов без визуальных признаков их избытка. Почвы обладают буферными свойствами к загрязняющим веществам, заключающиеся в том, что поступающие в них ТМ переводятся в формы недоступные растениям [3]. Поэтому, одним из путей детоксикации почв, загрязненных ТМ, является создание дополнительных экогеохимических барьеров путем внесения в них природных сорбентов, обеспечивающих сорбцию токсичных ТМ и, тем самым, уменьшающих их поступление в растительность [8]. Детоксикантами почв могут служить и другие природные вещества, не обладающие выраженными сорбционными свойствами, но регулирующие рН среды, создающие конкуренцию в выборе металлов растениями и, в конечном итоге, благотворно влияющих на снижение концентрации ТМ в растительности (известняки, доломиты и др.) [1, 5].

Цель и методика исследований.

Целью работы было изучение технологий экогеохимической рекультивации почв, загрязненных ТМ, и отличающихся уровнем естественного плодородия (табл. 1).

Исследования проводились в микрополевым опыте. Микроделянка представляла собой площадку размером 1 × 1 м с засыпанной на глубину 25 см изучаемой почвой из пахотного слоя. Повторность в опыте четырехкратная. Внесением водорастворимых солей цинка, меди, свинца и кадмия в почвах моделировали высокий уровень полиметаллического загрязнения (по шкале Обухова А. И. и Ефремовой Л. Л. [7]).

Изучали две технологии экогеохимической рекультивации почв (ТЭРП). В первой (ТЭРП-1) в качестве рекультиванта в почву вносили диатомит в количестве 1 % от массы почвы; во второй (ТЭРП-2) — суперфосфат в дозе 500 мг/кг почвы. Фоном для обеих технологий было внесение торфонавозного компоста — 7 кг/м², извести — 700 г/м², аммиачной селитры, суперфосфата двойного и хлористого калия из расчета по 100 кг д. в. на 1 га.

Исследования проводились в звене севооборота: ячмень — кукуруза — пшеница.

Результаты исследований.

Учет урожая в опытах показал, что наибольшее токсическое действие тяжелых металлов проявляется на малогумусных, слабобуферных дерново-подзолистой и серой лесной почвах. Здесь, во все годы исследований, отмечалась гибель растений в фазе всходов (табл. 2).

Высокое содержание гумуса на черноземных почвах способствует детоксикации тяжелых металлов, однако, в первый год исследований и на этих почвах величина урожая составила лишь 0,8–2,1 % от контроля и была недостоверной.

В последующие годы инактивирующая роль черноземных почв проявилась более отчетливо. Урожайность в загрязненных тяжелыми металлами вариантах составила: на черноземе оподзоленном 58–68 %, лугово-черноземной почве 47–51 % от контроля.

Из изученных приемов рекультивации более эффективной, на почвах с низким содержанием гумуса, была технология (ТЭРП-1) с внесением диатомита.

В год закладки опыта, урожайность ячменя составила на дерново-подзолистой — 104 %, светло-серой лесной — 106 %, серой лесной почве — 190 % от контроля. Преимущество этой технологии сохраняется на этих почвах и в последующие годы.

На черноземных почвах эффективность обеих технологий была практически одинаковой, несколько отличаясь в разные годы и по культурам.

Учитывая, что растения в первую очередь поглощают из почвы мобильные, как правило, извлекаемые слабокислотными вытяжками формы элементов, в том числе и тяжелых металлов, нами изучалось содержание и динамика подвижных форм ТМ.

Таблица 1
Некоторые физико-химические показатели почв в микрополевым опыте

Почва*	Гумус, %	рНсол.	ЕКО, ммоль/100 г
Дерново-слабподзолистая (Л ⁰)	2,2	4,5	12,0
Серая лесная (Л ₂)	4,4	5,3	24,0
Чернозем оподзоленный (Ч ⁰¹)	8,2	5,8	38,6
Лугово-черноземная (Ч ₂)	12,1	6,2	49,0

Примечание: * — по гранулометрическому составу все почвы тяжелосуглинистые.

Таблица 2
Влияние свойств почв и приемов рекультивации на продуктивность сельскохозяйственных культур при загрязнении тяжелыми металлами (г/0,25 м²)

Почва	Вариант	Ячмень (зерно)	Кукуруза (зел. масса)	Пшеница (зерно)
Дерново-слабоподзолистая (ДР)	Контроль	34,4	498	36,3
	ТМ	гибель	гибель	гибель
	ТЭРП-1	35,8	598	44,2
	ТЭРП-2	27,7	419	40,3
Серая лесная (Л ₂)	Контроль	50,5	423	43,1
	ТМ	гибель	15	гибель
	ТЭРП-1	95,7	709	63,3
	ТЭРП-2	75,9	738	37,1
Чернозем оподзоленный (Ч ^{ол})	Контроль	81,3	965	55,2
	ТМ	0,6	658	32,5
	ТЭРП-1	104,2	1190	67,8
	ТЭРП-2	105,1	1090	74,0
Лугово-черноземная (Чл ₂)	Контроль	68,8	329	50,8
	ТМ	1,5	168	24,4
	ТЭРП-1	94,1	832	62,7
	ТЭРП-2	96,5	710	59,9
НСР ₀₅ частных различий:	почвы	1,72	44,4	1,63
	технологии	1,06	55,1	1,22
НСР ₀₅ главных эффектов:	почвы	0,86	22,2	0,68
	технологии	0,53	27,5	0,51

Таблица 3
Оценочная шкала опасности загрязнения почв тяжелыми металлами [6]

Экологическое состояние почв	Категория загрязнения почв	Значения показателя Zc
Удовлетворительное	Допустимая	менее 8
Относительно удовлетворительное	Слабо опасная	от 8 до 16
	Умеренно опасная	от 16 до 32
Почвы чрезвычайной экологической ситуации	Опасная	от 32 до 64
	Весьма опасная	от 64 до 128
Почвы территорий экологического бедствия	Чрезвычайно опасная	128 и более

Высокий уровень загрязнения почвы валовыми количествами ТМ способствовал увеличению их подвижных форм.

Принимая во внимание полиметаллический характер загрязнения, для обобщенной оценки степени загрязнения почв ТМ, использовали известный показатель Zc [6], рассчитанный по формуле (по предложению Ильина [4] нами использованы не кларковые содержания ТМ, а установленные величины ПДК, предполагая тем самым определенный учет неодинаковой токсичности ТМ):

$$Zc = \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{ПДК_j}, \quad (1)$$

где C_j — концентрации, большие или равные ПДК подвижных форм;

ПДК_j — предельно допустимая концентрация подвижных форм j элемента;

n — число слагаемых элементов

Показатель Zc позволяет оценить суммарную степень загрязнения почв и характер экологической опасности (табл. 3).

Расчетные величины показателя Zc в почвах при применении различных ТЭРП приведены в табл. 4. Сравнение расчетных данных величины Zc в опыте со шкалой опасности загрязнения почв показывает, что при высоком уровне загрязнения почв валовыми формами ТМ дерново-подзолистая почва, во все годы наблюдений, находится в категории опасно загрязненных земель.

Серая лесная почва имеет опасную степень загрязнения в первые два года, на третий переходит в категорию умеренно опасных. В черноземных почвах индекс суммарного загрязнения в 1,5–2 раза ниже, что свидетельствует о положительной роли органического вещества в связывании и детоксикации подвижных форм ТМ. Эти почвы из категории умеренно опасных на третий год после загрязнения становятся слабо опасными.

Рекультиванты снижают содержание подвижных форм ТМ и, соответственно, индекс суммарного загрязнения почв, в среднем на 15–20 % и способствуют переходу почв в менее опасные по степени загрязнения категории. В дальнейшем, с каждым

Таблица 4

Влияние почвенных условий и приемов рекультивации на суммарный показатель загрязнения почв (Zc)

Почва	1-й год			2-й год			3-й год		
	ТМ	ТЭРП-1	ТЭРП-2	ТМ	ТЭРП-1	ТЭРП-2	ТМ	ТЭРП-1	ТЭРП-2
<i>П^р</i>	51	40	40	44	34	32	40	21	22
<i>Л₂</i>	43	31	31	35	25	23	25	17	18
<i>Чол</i>	26	17	18	20	14	11	12	5	6
<i>Чл₂</i>	25	14	15	18	12	9	11	5	5

Таблица 5

Содержание тяжелых металлов в растениях, мг/кг сухой массы

Почва	Элемент	Ячмень			Кукуруза			Пшеница			ПДК
		ТМ	ТЭРП-1	ТЭРП-2	ТМ	ТЭРП-1	ТЭРП-2	ТМ	ТЭРП-1	ТЭРП-2	
<i>П^р</i>	Zn	240,5	125,1	114,7	193,3	102,4	99,7	155,8	80,7	83,2	50
	Cu	220,8	119,5	130,0	201,2	93,6	95,7	142,6	79,2	82,1	30
	Pb	90,4	16,8	15,2	53,2	11,36	11,71	40,9	8,42	8,58	5
	Cd	6,64	1,21	1,13	4,05	0,9	0,85	2,2	0,74	0,71	0,1
<i>Л₂</i>	Zn	227,0	88,7	101,0	183,9	71,8	82,3	142,4	55,2	48,7	50
	Cu	192,1	93,7	89,2	180,1	74,2	77,5	130,5	61,8	64,9	30
	Pb	84,3	12,5	13,7	40,5	10,7	10,92	32,5	7,52	7,88	5
	Cd	6,21	1,00	0,98	3,93	0,68	0,70	1,72	0,5	0,52	0,1
<i>Чол</i>	Zn	168,2	74,8	69,6	124,5	57,9	52,0	67,2	26,3	29,9	50
	Cu	150,3	75,9	80,2	121,3	63,2	58,1	72,1	31,5	35,3	30
	Pb	46,5	10,7	11,3	9,3	5,61	5,17	6,1	3,12	2,52	5
	Cd	4,88	0,78	0,84	2,86	0,59	0,62	1,3	0,34	0,38	0,1
<i>Чл₂</i>	Zn	181,5	74,2	67,7	112,9	55,5	57,6	72,2	23,6	27,1	50
	Cu	154,7	81,4	85,7	117,8	55,5	48,8	69,2	30,5	29,6	30
	Pb	51,7	9,65	10,1	8,4	4,4	4,84	5,5	2,7	3,22	5
	Cd	5,02	0,73	0,66	3,00	0,60	0,64	1,2	0,3	0,33	0,1

годом, содержание ТМ в почвах снижается за счет выноса этих элементов растениями ячменя и связывания почвенным поглощающим комплексом. В результате, при использовании рекультивантов, на третий год исследований дерново-подзолистая и серая лесная почвы имеют категорию умеренно опасно загрязненных, а черноземные почвы — допустимо загрязненных. При этом эффективность применения обеих технологий для детоксикации почв была одинаковой.

Ряд исследователей [4, 8] считает более надежным показателем опасности загрязнения почв содержания ТМ в растениях, выращенных на этих почвах, сравнивая их с уровнями заданных гигиенических нормативов (ГН) или предельно допустимых содержаний (ПДС) ТМ в растениях, определяющих их токсичность при использовании растений в кормовых и пищевых целях.

Результаты анализов растительных образцов (табл. 5) показали, что при увеличении содержания подвижных форм ТМ в почвах происходит повышение их концентрации в растениях.

В растительных образцах, отобранных с загрязненных почв, содержание всех тяжелых металлов значительно превышает ПДК. Концентрация свинца и, особенно, кадмия (одного из самых токсичных из изучаемых элементов) в продукции превышает нормативы в десятки раз.

Высокое содержание гумуса в черноземных почвах препятствовало накоплению токсических элементов в растениях. Так, в среднем, содержание Zn в растениях, выращенных на черноземах, было на 25 % ниже содержания этого элемента в расте-

ниях, полученных на малогумусных почвах, Cu — на 26 %, Pb — на 44 %, Cd — на 23 %.

Внесение рекультивантов в значительной степени снижает накопление ТМ в растениях. В вариантах с ТЭРП наблюдается снижение концентрации цинка и меди в 2–3 раза, а свинца и кадмия в 5–10 раз.

Для интегральной оценки загрязнения растительности тяжелыми металлами предложен и рассчитан (табл. 6) критерий (ИОЗ):

$$ИОЗ = \frac{ИОЗ}{m}, \quad (2)$$

$$где\ иоз = \sum_{i=1}^m \frac{Cp}{ГН}, \quad (3)$$

C_p — содержания ТМ (химических элементов), мг/кг сухой массы;

C_{гн} — заданный гигиенический норматив (ГН, ПДК) в тех же единицах;

m — число суммируемых ТМ (химических элементов), шт.

Критерий ИОЗ характеризует среднюю интенсивность загрязнения растительной продукции ТМ (химическими элементами).

Приведенные данные свидетельствуют о достаточно серьезном загрязнении продукции ТМ в вариантах без применения приемов рекультивации. Превышение содержаний ТМ над гигиеническими нормативами по всем элементам (наиболее значительное для Cd), а также значения показателя ИОЗ превышающие 1, свидетельствуют о непригодности полученной продукции для употребления в пищу и на корм скоту даже в вариантах с ТЭРП.



Таблица 6

Влияние почвенных условий и приемов рекультивации на показатель интегральной оценки загрязнения (ИОЗ) растительности

Почва	Ячмень			Кукуруза			Пшеница		
	ТМ	ТЭРП-1	ТЭРП-2	ТМ	ТЭРП-1	ТЭРП-2	ТМ	ТЭРП-1	ТЭРП-2
<i>Гр</i>	24,2	5,5	5,3	15,4	4,1	4,0	9,5	3,3	3,3
<i>Л₂</i>	22,5	4,4	4,4	6,8	3,2	3,4	7,7	2,4	2,5
<i>Ч^{оп}</i>	16,6	3,5	3,7	9,3	2,6	2,6	4,5	1,4	1,5
<i>Ч₂</i>	17,3	3,4	3,2	9,5	2,5	2,5	4,2	1,3	1,4

Тем не менее, сравнивая величины ИОЗ в растениях на контрольных микроделянках, с исходно загрязненными почвами, и величины ИОЗ в тех же растениях, выращенных на рекультивированных почвах (при разных вариантах ТЭРП), можно судить об относительном снижении общего количества ТМ, при том же геохимическом спектре загрязняющих ТМ и, следовательно, о практической эффективности применяемых технологий.

Выводы

1. Проведенные исследования подтвердили зависимость фитотоксичности тяжелых металлов от свойств почв характеризующих их адсорбционную способность: содержание гумуса, емкость катионного обмена и т. д.

2. Защитные (буферные) функции почв можно усилить дополнительным внесением соответствующих рекультивантов.

3. Агроэкологическая эффективность обеих технологий (ТЭРП) была практически одинакова.

Литература

- Алексеев Ю. В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. М. : Агропромиздат, 1987. 142 с.
- Беличев А. А. Воздействие гербицидов и элементов питания на компоненты почвенных и растительных систем Зауралья : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Курган, 2000. 16 с.
- Ильин В. Б. Оценка буферности почв по отношению к тяжелым металлам // Агрохимия. 1995. № 10. С. 109–113.
- Ильин В.Б. Система показателей для оценки загрязненности почв тяжелыми металлами // Агрохимия. 1995. № 1. С. 94–99.
- Ильин В. Б. Тяжелые металлы в системе «почва — растение». Новосибирск : Наука, Сиб. отделение, 1991. 151 с.
- Методические рекомендации по оценке степени опасности загрязнения почвы химическими веществами. М. : Минздрав СССР ИМГРЭ, 1987. 25 с.
- Обухов А. Я., Ефремова Л. Л. Охрана и рекультивация почв, загрязненных тяжелыми металлами // Тяжелые металлы в окружающей среде и охрана природы : материалы 2-й Всесоюз. конф. М., 1988. Ч. 1. С. 23.
- Шильников И. А., Лебедев С. Н. и др. Факторы, влияющие на поступление тяжелых металлов в растения // Агрохимия. 1994. № 10. С. 94–101.

References

- Alexeev Yu. V. Heavy metals in soils and plants. M. : Agropromizdat, 1987. 142 p.
- Belichev A. A. The impact of herbicides and nutrients on the components of soil and plant systems of Urals region : author. dis. ... cand. agricult. sc. Kurgan, 2000. 16 p.
- Ilyin V. B. Testing of soil pollution with heavy metals // Agrochemistry. 1995. № 10. P. 109–113.
- Ilyin V. B. The system of criteria for testing soil pollution with heavy metals // Agrochemistry. 1995. № 1. P. 94–99.
- Ilyin V. B. Heavy metals in the system "soil — plants". Novosibirsk : Nauka, Siberian department, 1991. P. 151.
- Methodical recommendations for testing of danger level of soil pollution with chemical substances. M. : USSR Health Ministry, 1987. P. 25.
- Obukhov A. Ya., Efremova L. L. Preservation and recultivation of soils polluted with heavy metals // Heavy metals in the environment and nature conservation : materials of the 2nd USSR conference. M., 1988. Vol. 1. P. 23.
- Shylnikov I. A., Lebedev S. N. Factors influencing the inflow of heavy metals // Agrochemistry. 1994. № 10. P. 94–101.