

## ВЛИЯНИЕ МЕЛИОРАТИВНЫХ ПРИЕМОВ НА МИГРАЦИЮ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЕ

**В.А. Касатиков**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор,

ВНИИОУ – филиал ФГБНУ «Верхневолжский ФАНЦ»,

г. Владимир, Россия

### Аннотация

В статье представлены результаты исследований, полученные в краткосрочном опыте по изучению влияния различных мелиорантов на миграцию тяжелых металлов в слое 0–40 см дерново-подзолистой супесчаной почвы. Делается вывод, что использование мелиоративных приемов в сочетании с действием осадка городских сточных вод оказывает пролонгированное влияние на агроэкологические свойства слабокультуренной дерново-подзолистой супесчаной почвы.

**Ключевые слова:** осадок сточных вод, мелиорант, почва, тяжелые металлы

### Abstract

*N. Dajneko, S. Timofeev*

### THE INFLUENCE OF RECLAMATION TECHNIQUES ON THE HEAVY METALS MIGRATION IN SOD-PODZOL SANDY LOAM SOIL

This article presents the results of studies on the effect of various ameliorators on the migration of heavy metals in a 0–40 cm sod-podzol sandy loam soil, obtained in the short-term experience. It is concluded that the use of reclamation techniques in combination with the action of municipal wastewater sludge has a prolonged effect on the agroecological properties of poorly cultivated sod-podzol sandy loam soil.

**Keywords:** sewage sludge, ameliorator, the soil, heavy metals

### Введение

Осадки сточных вод (ОСВ) и твердые коммунальные отходы являются одним из основных отходов производственной деятельности человека. Использование ОСВ на удобрение в исходном состоянии или же в составе компоста или почвогрунта – один из приемов его утилизации [1].

Внесение ОСВ в почву проявляется в интенсивном влиянии на агрохимические свойства почв, увеличении запасов органического вещества, усилении нитрификации в пахотном слое, возрастании биологической активности почвы, увеличении количества целлюлозоразлагающих бактерий и уменьшении доли плесневых грибов. Особенно отчетливо почвоулучшающие свойства ОСВ проявляются на песчаных, супесчаных и малоплодородных деградированных почвах [2].

Наиболее серьезной проблемой, связанной с использованием ОСВ, является возможность аккумуляции тяжелых металлов (ТМ) в почве и растениях. В этой связи следует отметить большое значение типа почвы, ее физико-химических свойств и вида культуры [3]. Почва, имеющая высокую катионообменную емкость, способна необменно поглощать ТМ, поэтому она характеризуется более низкой их активностью по отношению к растениям.

Гумус почвы и органическое вещество удобрений могут вступать в реакцию с металлами. В результате образуются соединения, малодоступные растениям. Кроме того, для основной массы ТМ наблюдается снижение подвижности при увеличении рН почвы до 6,0 и более (влияние на подвижность ТМ).

Увеличение доз вводимого в почву ОСВ способствует соответствующему росту в ней Cd, Ni, Cr, Cu, Zn [4]. При этом степень подвижности ТМ возрастает неадекватно дозе вносимого ОСВ. С этим связано отсутствие пропорциональной зависимости величины накопления ТМ в растениях от дозы вносимого осадка.

Применяя различные мелиорирующие средства, можно существенно повысить иммобилизацию ТМ в почве и тем самым снизить их поступление в растения.

### Методика исследований

В данной статье приведены результаты исследований по изучению действия мелиорантов на агрохимические свойства почвы, удобренной высокой дозой осадков сточных вод (100 т/га по сухому веществу). Размер делянок – 2,0×2,0 м. Повторность опыта – пятикратная. Схема опыта следующая: 1) контроль; 2) фон – 100 т/га ОСВ; 3) фон + цеолит 15 т/га; 4) фон + цеолит 30 т/га; 5) фон + глина 200 т/га;

6) фон + торф + дол. мука 6 т/га; 7) фон + дол. мука 6 т/га; 8) фон + глина 200 т/га + дол. мука 6 т/га.

Полевые исследования проводились на дерново-подзолистой супесчаной почве, сформированной на двухчленных ледниковых отложениях. Пахотный и иллювиальный горизонты находятся в толще супесчаного отложения, перекрывающего тяжелый моренный суглинок. Исходная агрохимическая характеристика слоя почвы 0–20 см: рН<sub>сол.</sub> – 6,0, Нг. – 1,05 мг-экв./100 г почвы, S – 7,0 мг-экв./100 г почвы, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 95 мг/кг почвы, K<sub>2</sub>O – 43 мг/кг почвы, Сорг. – 0,8%.

Исходная агрохимическая характеристика слоя почвы 0–20 см в 1984 г. следующая: рН<sub>сол.</sub> – 6,0, Нг. – 1,05 мг-экв./100 г почвы, S – 7,0 мг-экв./100 г почвы, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 95 мг/кг почвы, K<sub>2</sub>O – 43 мг/кг почвы, Сорг. – 0,8%.

Для выполнения исследований отбирались смешанные образцы из пахотного горизонта дерново-подзолистой почвы. В почвенных образцах проводилось определение агроэкологических параметров согласно следующим методам исследований: подвижные формы фосфора и калия определяли в вытяжке Кирсанова, фосфор – колориметрически по Дениже, калий – методом пламенной фотометрии;

содержание органического углерода – колориметрически по методу Тюрина в модификации Никитина. Валовое содержание ТМ в почве и их подвижные формы определялись согласно ФР 1.31.2002.00524.

#### Результаты и их обсуждение

Используемый в опыте ОСВ с очистных сооружений г. Владимира после 2–3-летнего мезофильного компостирования в буртах представляет собой рассыпчатую однородную массу темно-серого цвета. Он обладает рядом положительных свойств: содержит до 14 % органического углерода, имеет нейтральную реакцию. ОСВ характеризуется достаточно высокой зольностью, что связано с технологическими особенностями его формирования. По содержанию питательных элементов осадок не сбалансирован, в его составе соединения фосфора преобладают над азотом и калием (табл. 1). Отмечается высокий уровень содержания подвижных форм Cd, Zn и Ni. В вытяжку ААБ от валового содержания ТМ в ОСВ переходило 9–30 % Cd, 7–39 % Zn и 4–26 % Ni. Подвижность Cu и Pb значительно ниже: 3–7 и 1–2 % соответственно (табл. 2).

**Таблица 1 – Агрохимическая характеристика ОСВ и мелиорантов**

	ОСВ	Цеолит	Глина	Известь
<b>Зольность, %</b>	<b>66,8</b>	<b>95,9</b>	<b>98,1</b>	<b>98,7</b>
<b>Влажность, %</b>	<b>46,2</b>	<b>7,5</b>	<b>2,8</b>	<b>2,4</b>
<b>рН<sub>КСL</sub></b>	<b>5,9</b>	<b>6,5</b>	<b>4,5</b>	<b>8,2</b>
<b>N общ, %</b>	<b>1,27</b>	–	–	–
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> общ, %</b>	<b>2,22</b>	<b>0,22</b>	<b>0,25</b>	<b>0,16</b>
<b>K<sub>2</sub>O общ, %</b>	<b>0,51</b>	<b>1,27</b>	<b>0,70</b>	<b>0,64</b>

**Таблица 2 – Содержание тяжелых металлов в осадках сточных вод, мг/кг сухого вещества**

Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
<b>Валовое содержание</b>							
<b>80</b>	<b>1115</b>	<b>873</b>	<b>38 400</b>	<b>720</b>	<b>367</b>	<b>120</b>	<b>3135</b>
<b>Солянокислая вытяжка</b>							
<b>36</b>	<b>400</b>	<b>431</b>	<b>13 200</b>	<b>236</b>	<b>125</b>	<b>41</b>	<b>1184</b>
<b>Ацетатно-аммонийный буфер (рН 4,8)</b>							
<b>7,1</b>	<b>1</b>	<b>25,7</b>	<b>41,5</b>	<b>4,45</b>	<b>15,75</b>	<b>1,5</b>	<b>225</b>
<b>СанПиН 2.1.7.573-96</b>							
<b>30</b>	<b>1200</b>	<b>1500</b>	–	–	<b>400</b>	<b>1000</b>	<b>4000</b>

Интерес представляет не только валовое содержание ТМ в ОСВ, но и их подвижность, характеризующая способностью переходить в вытяжку ацетат-аммонийного буфера. В эту вытяжку переходит 7,2 % от валового содержания цинка и 9 % от валового содержания кадмия. Никель, медь и хром менее подвижны. Их содержание в этой вытяжке варьирует от 4 до 0,1 %. В вытяжку 1М соляной кислоты переходит от 49 до 34 % всех рассмотренных металлов, что говорит о возможном наличии идентичных типов связей этих металлов в ОСВ. Однако характеристика подвижности металлов в ОСВ не дает право судить о потенциальном поведении ТМ в почве.

В табл. 3 приведено валовое содержание ТМ в неорганических мелиорантах. В соответствии с ним используемые в опыте цеолит и глина не содержат избыточного количества отдельных видов ТМ. Следует отметить только повышенное содержание хрома и никеля в цеолите, никеля – в глине.

При внесении ОСВ в почву на фоновом варианте отмечается рост валового содержания всей ТМ (рис. 1). В частности, уровень Cd, Cr, Cu, Ni, Pb и Zn повышается на 650, 83, 70, 47, 40 и 111 % соответственно. Для анализа относительного изменения содержания ТМ в этой и последующих таблицах применялись коэффициенты концентрации ( $K_c$ ), рассчитываемые по формуле:

$$K_c = C_a / C_f$$

где  $C_a$  – аномальная концентрация элемента в варианте,

$C_f$  – концентрация элемента на контроле.

По значениям  $K_c$  фонового варианта выделен следующий убывающий ряд элементов:  $Cd > Zn > Cr > Cu > Ni > Pb$ . Согласно этому ряду под действием используемых в опыте ОСВ в максимальной степени повышается содержание в пахотном слое почвы Cd, а в минимальной – Pb, что обусловлено, с одной стороны, низким фоновым содержанием Cd в дерново-

подзолистой почве опытного участка, а с другой стороны, повышенной концентрацией Cd в ОСВ.

Внесение мелиорантов, содержащих невысокое количество ТМ, особенно Cd и Pb, не оказало существенного влияния на концентрацию отдельных ТМ в слое почвы 0–20 см. В качестве основного показателя, определяющего влияние ТМ на элементный состав почвы, использовался показатель суммарного загрязнения почвы

$$Z_c = \sum K_c - (n - 1),$$

где:  $K_c$  – коэффициент концентрации,  $n$  – число элементов с  $K_c > 1$ .

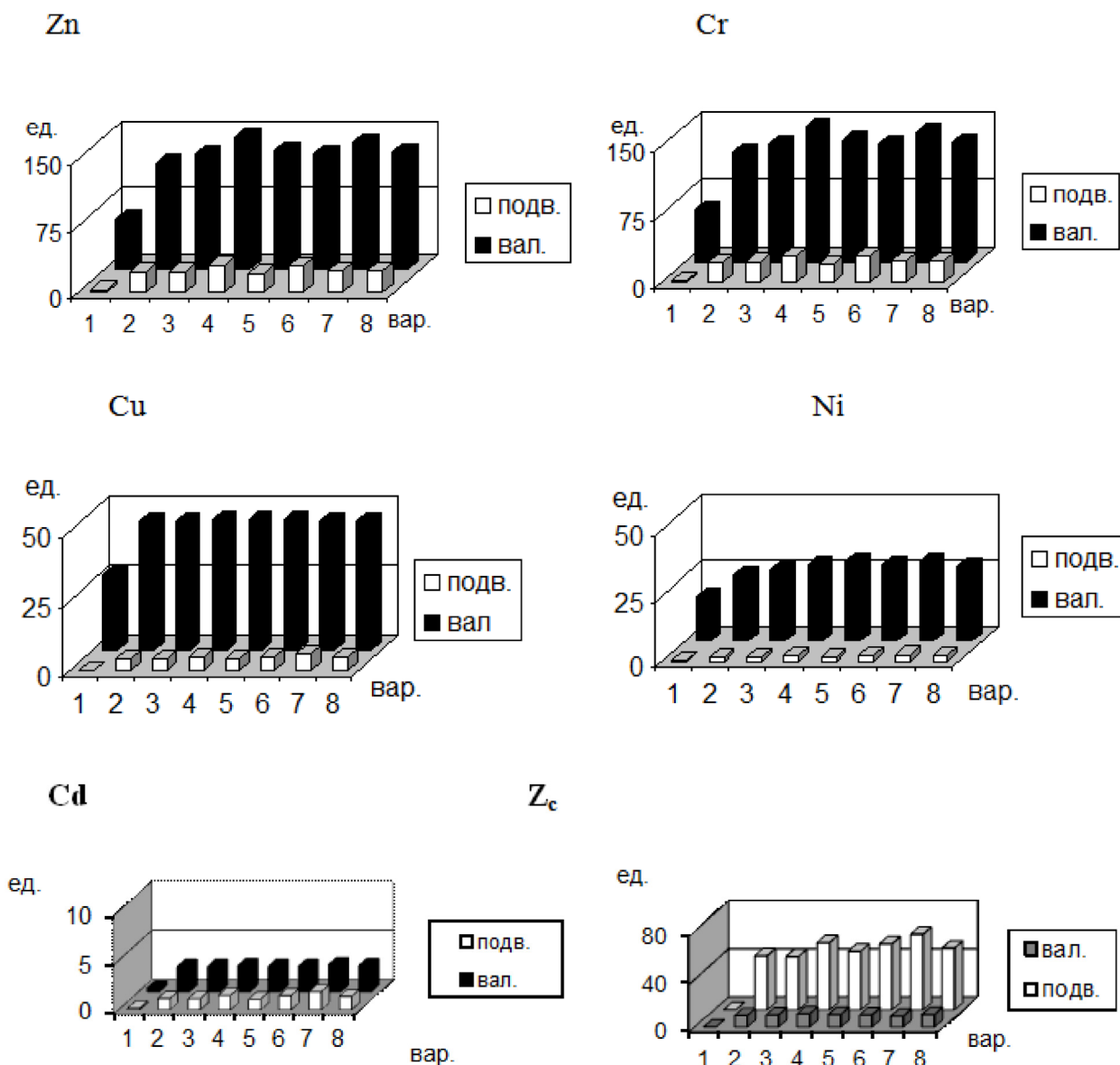
В соответствии с величинами  $K_c$  наибольший уровень загрязнения почвы в слое 0–20 см получен при внесении по фону ОСВ цеолита в дозе 30 т/га и глины в сочетании с доломитовой мукой, что обусловлено дополнительным поступлением с ними в почву Cr, Cu, Ni, Zn. Исходя из величины  $Z_c$  по вариантам опыта и соотнося их с критериями загрязненности почвы по данному показателю [3], следует отметить, что пахотный слой почвы по степени загрязнения находится на границе слабо- и среднезагрязненной почвы.

Наряду с положительным влиянием на агрохимические свойства почвы слоя 20–40 см ОСВ и мелиоранты способствуют изменению в ней концентрации ТМ, в первую очередь их подвижных форм. Это свидетельствует о наличии процессов миграции и перераспределения ТМ в слое 0–40 см (табл. 4).

Однако, в отличие от слоя 0–20 см, в слое 20–40 см получено существенное снижение как концентрации отдельных видов ТМ, так и их  $K_c$ , в частности  $K_c Cd$  снизилось с 6,5–7,0 ед. в слое 0–20 см до 1,67–2,0 ед. в слое 20–40 см,  $K_c Zn$  уменьшилось с 2,11–2,51 ед. в слое 0–20 см до 1,35–1,81 в слое 20–40 см.

**Таблица 3 – Содержание тяжелых металлов в мелиорантах, мг/кг сухого вещества**

№ п/п	Мелиорант	Металлы								
		Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
1	Цеолит	<0,3	3	90	18	26 800	81	35	9	67
2	Глина	<0,3	8	57	21	29 600	202	36	14	56



**Рисунок 1 – Действие ОСВ и мелиорантов на валовое содержание и концентрацию подвижных форм ТМ в слое 0–20 см дерново-подзолистой супесчаной почвы, мг/кг сухого вещества.**

1 – контроль, 2 – ОСВ 100т/га – фон, 3 – фон + цеолит 15 т/га, 4 – фон + цеолит 30 т/га, 5 – фон + глина + доломитовая мука, 6 – фон + глина, 7 – фон + торф + доломитовая мука, 8 – фон + доломитовая мука, Z<sub>c</sub> – показатель суммарного загрязнения почвы.

Оценивая действие мелиорантов на миграцию ТМ в слое 0–40 см, следует выделить роль доломитовой муки как отдельно, так и в сочетании с глиной в снижении K<sub>c</sub> ТМ. В данном случае известкование способствует иммобилизации ТМ и уменьшению их миграционной активности.

По величине Z<sub>c</sub> валового содержания ТМ, равного 4,2–6,0 ед., слой почвы 20–40 см относится к категории слабозагрязненного.

Уровень содержания в слое почвы 20–40 см подвижных форм ТМ, извлекаемых аммиачно-ацетатным буфером с pH = 4,8, в большей степени зависит от вида мелиорантов, чем валовое содержание ТМ. В первую очередь, это касается Cd, Cu, Ni, Zn (табл. 4).

**Таблица 4 – Действие ОСВ и мелиорантов на валовое содержание ТМ в слое 20–40 см дерново-подзолистой супесчаной почвы, мг/кг сухого вещества**

Варианты	Металлы					Z <sub>c</sub>
	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	
Контроль б/у	0,08	0,23	0,16	0,2	1,12	–
ОСВ 100 т/га – фон	0,21	0,44	0,36	0,3	3,57	7,5
Фон + цеолит 15 т/га	0,18	0,30	0,24	0,2	1,90	3,7
Фон + цеолит 30 т/га	0,31	0,32	0,29	0,2	2,04	5,9
Фон + глина + дол.мука	0,26	0,59	0,47	0,2	4,48	7,0
Фон + глина	0,33	0,40	0,44	0,2	2,72	7,3
Фон + торф + дол.мука	0,44	0,28	0,29	0,2	1,67	5,7
Фон + дол.мука	0,32	0,26	0,27	0,2	1,54	5,2

Таким образом, действие ОСВ оказывает значительно более высокое влияние на концентрацию подвижных форм Cd, Cu, Ni, Zn, чем на их валовое содержание (рис. 1, табл. 4). Данная зависимость обусловлена, с одной стороны, низкой фоновой концентрацией в слое 0–20 см изучаемых ТМ, а с другой – процессом разложения биомассы ОСВ и высвобождением ТМ из состава органоминеральных соединений.

Выявленный ряд K<sub>c</sub> в слое почвы 20–40 см: Cd > Zn > Ni > Cu > Pb – имеет уже иное распределение ТМ, чем в слое 0–20 см, что обусловлено, с одной стороны, различной миграционной активностью отдельных ТМ, а с другой – возросшим влиянием использованных в опыте мелиорантов за счет сорбционных процессов, протекающих в почве.

Следует отметить, что данный ряд K<sub>c</sub> существенно отличается от ряда K<sub>c</sub> по валовому содержанию ТМ. Применение мелиорантов заметно снижает миграционную активность рассматриваемой группы ТМ, особенно в вариантах с цеолитом и доломитовой мукой. Это обусловлено различием в формах и видах связи ТМ с органическим и минеральным компонентами ОСВ, что приводит к неадекватному валовому содержанию подвижных форм ТМ.

Рассматривая действия мелиорантов на концентрацию подвижных форм отдельных элементов и показателей Z<sub>c</sub> в слое почвы 0–20 см, следует отметить наибольший их уровень в вариантах с внесением по фону ОСВ торфа в сочетании с доломитовой мукой и при внесении глины в дозе 200 т/га. По вели-

чине Z<sub>c</sub> в слое 0–20 см относительно фона варианты опыта расположились в следующий ряд: фон + торф + доломитовая мука > фон + цеолит 30 т/га > фон + глина > фон + доломитовая мука > фон + глина + доломитовая мука > фон + цеолит 15 т/га > фон (рис. 1). Положительное влияние цеолита в дозе 30 т/га и глины на подвижность ряда ТМ обусловлено, с одной стороны, улучшением физических и физико-химических свойств почвы, способствующих, в свою очередь, активизации процессов разложения органо-минеральных соединений ОСВ и перевода ТМ в доступные растениям формы, а с другой стороны, отсутствием физико-химических факторов, снижающих подвижность ТМ в почве. Кроме того, при повышении поглощательной способности почвы под действием мелиорантов в виде цеолита в дозе 30 т/га и глины – 200 т/га, происходит изменение кислотно-щелочного баланса, способствующее росту подвижности Cd, Cu, Ni, Zn. Следует отметить, что выявленные зависимости в степени подвижности ТМ и величинах Z<sub>c</sub> по вариантам опыта сохраняются и в слое 20–40 см (табл. 4). Рассматривая действие мелиорантов на процессы миграции подвижных форм ТМ в слое 0–40 см, следует отметить, что для Cd наиболее активно они проходят на вариантах с глиной, цеолитом в дозе 30 т/га и при внесении доломитовой муки в сочетании с торфом и отдельно.

Близкая зависимость получена для Zn и в меньшей степени – для Ni и Cu. Уровень снижения K<sub>c</sub> в слое 20–40 см для отдельных элементов равен: Cd – в 2,1–2,7 раза, Cu – 2,8–4,0, Ni – 3,6–5,4,

а Zn – 1,5–3,4 раза. Выявленная зависимость свидетельствует о наиболее высокой миграционной активности Cd и Zn согласно значениям их  $K_c$  в слоях 0–20 и 20–40 см.

Таким образом, на формирование в слое 0–40 см дерново-подзолистой супесчаной почвы био-

геохимической аномалии и миграционные процессы влияют не только осадки сточных вод, но и мелиоранты, в первую очередь цеолит, глина и доломитовая мука.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анализ опыта почвенного пути утилизации осадков сточных вод / Н. К. Сюняев, М. В. Тюнькова, А. А. Слипец [и др.]. – М. : ФГОУ ВПО РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, 2008. – 108 с.
2. Касатиков, В. А. Агрэкологические и технологические аспекты использования осадков городских сточных вод в качестве удобрения / В. А. Касатиков, В. А. Черников, В. А. Раскатов // Экологические и технологические вопросы производства и использования органических и органоминеральных удобрений на основе осадков городских сточных вод и твердых бытовых отходов : материалы междунар. симпозиума. – Владимир, 2004. – С. 29-39.
3. Касатиков, В. А. К вопросу о поведении микроэлементов в системе почва-растение при использовании в качестве удобрения осадков городских сточных вод / В. А. Касатиков, В. Е. Руник // Агрохимия. – 1994. – № 5. – С. 53-55.
4. Касатиков, В.А. Критерии загрязненности почвы и растений микроэлементами, тяжелыми металлами при использовании в качестве удобрения осадков городских сточных вод / В. А. Касатиков // Агрохимия. – 1991. – № 11. – С. 78-83.

Поступила 20.08.2018