

СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АГРОЧЕРНОЗЕМЕ ЮЖНОГО ПРЕДУРАЛЬЯ ПРИ ВНЕСЕНИИ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД В КАЧЕСТВЕ УДОБРЕНИЯ[§]

© 2025 г. О. А. Мелентьева¹, И. М. Габбасова^{1,*}, Т. Т. Гарипов¹,
И. К. Хабиров²

¹Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН
450054 Уфа, просп. Октября, 69, Башкортостан, Россия

²Опытная станция “Уфимская”
450535 с. Чернолесовский, ул. Тополиная, 1,
Уфимский р-н, Башкортостан, Россия

*E-mail: gimb@mail.ru

Исследование проводили в южной лесостепи Республики Башкортостан на агроочерноземе тяжелосуглинистом, с высоким содержанием гумуса, близкой к нейтральной реакции среды, высокой емкостью катионного обмена с преобладанием кальция. Осадки сточных вод (*ОСВ*) с городских очистных сооружений г. Уфы были внесены в дозе 30 т/га и заделаны в верхний слой 0–20 см почвы. Образцы отбирали с глубин 0–5, 5–20 и 20–40 см через полгода после внесения. Внесение *ОСВ* привело к увеличению содержания гумуса, минерального азота (до 2.5 раза) подвижного фосфора (до 30%) и обменного калия (до 12%), а также нейтрализации почвенного раствора. При этом содержание подвижных форм Mn, Cu, Zn, Co, Pb и Cd не превышало 16.6% от ПДК, содержание валовых форм As, Zn, Pb, Hg, Cd, Cr, Co, Cu и Mn не превышало 51% от ПДК, суммарный химический показатель содержания ТМ был “допустимым” (2.6–10.2). Только концентрация Ni, которая в фоновой почве составляла 0.75 ПДК, увеличилась до 0.8 ПДК. Следовательно, содержание никеля являлось лимитирующим при внесении *ОСВ*, и он был ключевым элементом для мониторинга содержания ТМ в почвах.

Ключевые слова: агроочернозем, осадки сточных вод (*ОСВ*), тяжелые металлы, суммарный химический показатель.

DOI: 10.31857/S0002188125010095, **EDN:** VCGUAH

ВВЕДЕНИЕ

Утилизация отходов является одной из основных экологических проблем современной цивилизации. Особое место среди них занимают вещества, содержащие элементы питания растений, которые могут быть возвращены в биологический круговорот и использованы в сельском хозяйстве. К ним относятся осадки сточных вод (*ОСВ*), количество которых постоянно возрастает, составляя в РФ миллионы тонн в пересчете на сухое вещество и сотни миллионов – с учетом влажности. По содержанию углерода, азота, фосфора, калия и микроэлементов *ОСВ* не уступают традиционным органическим удобрениям. Многие авторы указывают на существенное повышение

плодородия и урожайности сельскохозяйственных культур, особенно при внесении *ОСВ* в почвы с низким естественным плодородием [1–5]. В то же время эффективность *ОСВ* отмечена и на почвах черноземного ряда [6–10]. Дозы *ОСВ* сильно варьируют от десятков [11–13] и сотен т/га [14], доходя до тысяч т/га в течение многолетнего опыта [15, 16] в зависимости прежде всего от почвенных условий и выращиваемых культур. Вместе с тем применение *ОСВ* в качестве удобрения даже после их обеззараживания от патогенной микрофлоры осложняется наличием тяжелых металлов (ТМ). При этом состав *ОСВ* зависит от технологии обработки, сезона, климатической зоны и конкретного города. Максимально допустимые дозы *ОСВ* не должны приводить к загрязнению почвы ТМ. Поэтому утилизация *ОСВ* путем использования в качестве органического удобрения должна соответствовать самым строгим гигиеническим нормативам и регулярно контролироваться.

[§]Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по теме № 123020800003-9. Часть данных была получена с использованием оборудования ЦКП “Агидель”.

Цель работы – изучение влияния осадков сточных вод на содержание тяжелых металлов при их внесении в агроценоз Южного Предуралья.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на агроценозе южной лесостепи Республики Башкортостан. Почва опыта характеризовалась высоким потенциальным плодородием: тяжелосуглинистым гранулометрическим составом, высоким содержанием гумуса, близкой к нейтральной реакцией среды, высокой емкостью катионного обмена с преобладанием кальция. *ОСВ* были взяты с городских очистных сооружений г. Уфы после окончания технологического цикла их обработки. *ОСВ* (влажность 21%) были внесены в дозе 30 т/га и заделаны в верхний слой 0–20 см почвы. Образцы были отобраны на 4-х пробных площадках и фоновой почве с глубин 0–5, 5–20 и 20–40 см через полгода после внесения.

Аналитические исследования проводили в соответствии с общепринятыми методами [17]: содержание гумуса определяли по Тюрину, нитратного азота – колориметрическим методом с дисульфоненоловой кислотой, аммонийного азота – колориметрическим методом с реагентом Несслера, подвижного фосфора и обменного калия – по Чирикову, обменных катионов – трилонометрическим методом, pH_{KCl} – потенциометрическим методом, гидролитическую кислотность – по методу Каппена в модификации ЦИНАО [18]. Содержание ТМ определяли по [19, 20].

Суммарный химический показатель (Z_c) определяли по формуле Саэта [21]: $Z_c = (\sum K_c) - (n - 1)$, где K_c – коэффициент концентрации i -го химического элемента, n – число, равное количеству элементов, входящих в геохимическую ассоциацию.

Коэффициент концентрации (K_c) рассчитывали по формуле: $K_c = C_i / C_{\text{фон}}$, где C_i – фактическое содержание элемента, $C_{\text{фон}}$ – геохимический фон.

Таблица 1. Агрохимические свойства почвы

Вариант	Контроль		Поле	
	0–5 см	5–20 см	0–5 см	5–20 см
Глубина, см				
Гумус, %	10.6 ± 0.9	7.9 ± 0.6	11.8 ± 0.9	11.9 ± 0.7
pH _{KCl}	5.6 ± 0.1	5.5 ± 0.1	6.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1
H_r , смоль/кг	3.79 ± 0.63	5.48 ± 0.91	1.98 ± 0.32	2.74 ± 0.45
Ca^{2+} , смоль/кг	25.6 ± 1.2	26.6 ± 1.1	24.7 ± 1.3	26.0 ± 1.0
Mg^{2+} , смоль/кг	3.4 ± 0.2	3.5 ± 0.1	3.3 ± 0.2	3.4 ± 0.3
N-NH ₄ , мг/кг	12.9 ± 0.8	6.2 ± 0.6	65.8 ± 1.9	20.0 ± 1.8
N-NO ₃ , мг/кг	28.9 ± 1.7	19.3 ± 1.1	37.6 ± 18.	36.6 ± 2.1
P ₂ O ₅ , мг/кг	169 ± 8	154 ± 7	220 ± 7	181 ± 8
K ₂ O, мг/кг	128 ± 1	125 ± 1	143 ± 1	137 ± 1

Определение максимально допустимой дозы внесения *ОСВ* проводили по формуле [22] с учетом глубины пахотного слоя:

$$\Delta_{OSB} = (0.8 \text{ПДК} - C_{\phi}) \times 2000 / C_{OSB},$$

где Δ_{OSB} – теоретически допустимая доза осадка, т сухой массы/га, C_{ϕ} – концентрация ТМ в фоновой почве, мг/кг, 2000 – масса слоя 0–20 см почвы, т сухой массы/га, C_{OSB} – концентрация ТМ в *ОСВ*, мг/кг.

Данные обрабатывали статистическими методами в программе MS Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Внесение *ОСВ* в агроценоз оказало заметное влияние на его агрохимические свойства: увеличилось содержание гумуса (особенно в слое 5–20 см) и питательных элементов (табл. 1).

Содержание минерального азота возросло в пахотном горизонте в 2.2–2.5 раза, преимущественно за счет его аммонийной формы, содержание которой увеличилось в слое 0–5 см в 5 раз, в слое 5–20 см – в 3 раза. Обеспеченность почвы подвижным фосфором возросла на 18–30%, перейдя из категории “высокая” в “очень высокую” в слое 0–5 см. Количество обменного калия изменилось в меньшей степени – на 9–12%. Внесение *ОСВ* способствовало также снижению гидролитической кислотности и нейтрализации почвенного раствора, при этом содержание поглощенных оснований существенно не изменилось. Во многом сходные тенденции к изменениям агрохимических свойств черноземов при внесении *ОСВ* выявлены и другими авторами [6, 8, 23]. Но при улучшении агрохимических свойств почвы может возникнуть опасность загрязнения токсичными элементами, особенно в регионах с повышенным фоновым содержанием ТМ и вблизи крупных промышленных центров.

Высокое содержание гумуса и нейтральная реакция среды обусловили низкое содержание подвижных форм ТМ (табл. 2).

При внесении *ОСВ* оно варьировало в диапазоне от 0.4 до 16.6% от ПДК и возрастало в ряду: Mn – Cu – Zn – Co – Pb. По сравнению с фоновой почвой только концентрации Co и Mn повысились в 1.5–2.0 раза, а содержание Zn в слое 0–5 см – в 8 раз. Концентрация этих элементов в *ОСВ* была заметно больше, чем в почве, но существенно меньше ПДК. Суммарный химический показатель составил в слоях 0–5, 5–20 и 20–40 см соответственно 10.2, 4.6, 3.6, что определяло уровень загрязнения как “допустимый”.

Валовое содержание валовых форм ТМ после внесения *ОСВ* не превышало ПДК (табл. 3).

Их суммарный химический показатель также был “допустимым” и в слоях 0–5, 5–20 и 20–40 см равнялся 4.8, 2.6, 4.7 соответственно. Вместе с тем необходимо отметить, что согласно ГОСТ Р 17.4.3.07-2001, запрещается использование *ОСВ* в качестве удобрения при содержании в почве отдельных ТМ в концентрациях, превышающих 0.8 ПДК, на основании чего рассчитывают максимально допустимую дозу внесения *ОСВ*. В данной работе концентрации ТМ в фоновой почве изменялись в диапазоне 0.09–0.51 ПДК за исключением никеля (0.75 ПДК). Следует отметить, что почвы Южного Предуралья отличаются его повышенным содержанием [24, 25]. Никель относится к умеренно подвижным элементам, для которых характерно как накопление, так и частичный вынос [26], а коэффициент его миграции

из внесенного в почву *ОСВ* оценивали в пределах 10–11% [27]. Максимально допустимая доза внесения *ОСВ*, рассчитанная по величине содержания этого элемента, составила 98 т/га. Однако после внесения 30 т *ОСВ*/га валовое содержание никеля (с учетом погрешности определения) вплотную приблизилось к величине 0.8 ПДК, что привело к опасности загрязнения почвы и нецелесообразности дальнейшего внесения *ОСВ* в почву этого поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, утилизация *ОСВ* путем использования его в качестве удобрения в дозе 30 т/га привело к увеличению содержания гумуса, минерального азота (до 2.5 раза), подвижного фосфора (до 30%) и обменного калия (до 12%), а также нейтрализации почвенного раствора. При этом содержание подвижных форм Mn, Cu, Zn, Co, Pb и Cd не превышало 16.6% от ПДК, содержание валовых форм As, Zn, Pb, Hg, Cd, Cr, Co, Cu и Mn также не превышало 51% от ПДК. Суммарный химический показатель содержания ТМ был “допустимым”. Только концентрация Ni, которая в фоновой почве составляла 0.75 ПДК, увеличилась до 0.8 ПДК. Следовательно, содержание никеля было лимитирующим при внесении *ОСВ* и ключевым элементом для мониторинга содержания ТМ в почвах.

Таблица 2. Содержание подвижных форм ТМ при внесении *ОСВ* в качестве удобрения, мг/кг

Элемент	Глубина, см	Поле	Контроль	<i>ОСВ</i>	ПДК
Цинк	0–5	1.59 ± 0.41	0.20 ± 0.02	4.10 ± 0.93	23
	5–20	0.82 ± 0.14	0.20 ± 0.04		
	20–40	0.54 ± 0.10	0.23 ± 0.03		
	0–5	1.0 ± 0.1	0.9 ± 0.1		
Свинец	5–20	0.9 ± 0.1	0.9 ± 0.1	1.2 ± 0.2	6
	20–40	1.0 ± 0.1	0.8 ± 0.1		
	0–5	0.12 ± 0.04	<0.05		
Кадмий	5–20	<0.05	<0.05	0.44 ± 0.09	—
	20–40	<0.05	<0.05		
Кобальт	0–5	0.34 ± 0.07	0.28 ± 0.11	0.63 ± 0.25	5
	5–20	0.29 ± 0.06	0.21 ± 0.08		
	20–40	0.60 ± 0.04	0.33 ± 0.10		
Медь	0–5	0.18 ± 0.03	0.16 ± 0.02	0.50 ± 0.08	3
	5–20	0.16 ± 0.02	0.16 ± 0.01		
	20–40	0.10 ± 0.01	0.14 ± 0.03		
Марганец	0–5	46.0 ± 3.4	32.4 ± 2.3	74.2 ± 5.1	140
	5–20	32.0 ± 2.7	29.1 ± 1.9		
	20–40	48.3 ± 3.1	33.8 ± 3.3		

Таблица 3. Содержание валовой формы ТМ в черноземе при внесении *ОСВ* в качестве удобрения, мг/кг

Элемент	Глубина, см	Поле	Контроль	<i>ОСВ</i>	ПДК
Мышьяк	0–5	4.8 ± 0.4	4.4 ± 0.3	4.8 ± 0.3	10
	5–20	3.9 ± 0.7	3.3 ± 0.4		
	20–40	3.8 ± 0.2	3.6 ± 0.2		
Цинк	0–5	95.0 ± 4.8	77.7 ± 9.6	92.8 ± 4.7	220
	5–20	79.8 ± 2.6	72.2 ± 6.2		
	20–40	72.8 ± 1.8	67.1 ± 3.2		
Свинец	0–5	9.9 ± 0.3	10.7 ± 1.2	12.3 ± 2.2	130
	5–20	10.4 ± 0.6	11.8 ± 0.8		
	20–40	10.7 ± 0.5	11.2 ± 1.1		
Кадмий	0–5	0.40 ± 0.07	0.14 ± 0.05	1.02 ± 0.41	2
	5–20	0.18 ± 0.04	0.17 ± 0.06		
	20–40	0.07 ± 0.01	0.05 ± 0.02		
Ртуть	0–5	0.06 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.16 ± 0.07	2.1
	5–20	0.05 ± 0.01	0.04 ± 0.01		
	20–40	0.05 ± 0.01	0.02 ± 0.01		
Хром	0–5	81.5 ± 8.4	61.0 ± 5.6	77.5 ± 9.6	—
	5–20	74.3 ± 5.7	58.8 ± 4.4		
	20–40	76.8 ± 4.3	61.4 ± 4.7		
Кобальт	0–5	13.29 ± 0.25	12.14 ± 0.14	13.54 ± 0.37	—
	5–20	13.28 ± 0.42	12.41 ± 0.41		
	20–40	13.75 ± 0.25	11.93 ± 0.48		
Никель	0–5	62.8 ± 2.7	60.2 ± 1.9	62.3 ± 3.5	80
	5–20	66.2 ± 1.7	61.2 ± 0.1		
	20–40	70.0 ± 1.9	62.8 ± 2.9		
Медь	0–5	31.66 ± 1.04	27.65 ± 1.65	52.26 ± 2.15	132
	5–20	28.60 ± 0.81	26.55 ± 1.55		
	20–40	26.75 ± 0.85	24.95 ± 1.12		
Марганец	0–5	705.3 ± 21.1	663.2 ± 27.1	658.2 ± 30.7	1500
	5–20	683.0 ± 29.0	667.4 ± 28.3		
	20–40	675.3 ± 35.9	653.8 ± 24.2		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А.И., Иванов И.А., Иванова Ж.А., Цыганова Н.А., Мусеев Д.А. Азотный режим легких дерново-подзолистых почв и пути его улучшения в современных условиях // Агрохимия. № 9. 2008. С. 5–15.
2. Кириллов Н.А., Фадеева Н.А. Перспективы использования осадков сточных вод для повышения продуктивности малогумусных почв // Экол. вестн. Север. Кавказа. 2015. Т. 1. № 1. С. 79–83.
3. Варламова Л.Д., Короленко И.Д. Нетрадиционные удобрительные материалы в растениеводческом комплексе России и Нижегородской области // Агрохим. вестн. 2017. № 2. С. 15–20.
4. Жигарева Ю.В. Агрэкологическая оценка эффективности осадков сточных вод при возделывании картофеля // Вестн. ТвГУ. Сер. биол. и экол. 2018. № 1. С. 194–202.
5. Васбиеева М.Т., Косолапова А.И. Тяжелые металлы в системе почва–растения при утилизации осадков сточных вод в качестве удобрения // Агрохимия. 2018. № 3. С. 83–89.
DOI: 10.7868/S0002188118030110
6. Юмашев Н.П. Использование осадков сточных вод в качестве удобрений на выщелоченных черноземах Тамбовской области // Агрохимия. 2008. № 2. С. 57–65.
7. Арефьев А.Н. Влияние осадков сточных вод и их сочетаний с цеолитом на плодородие лугово-черноземной почвы и урожайность сельскохозяйственных культур // Агропром. технол. Центральной России. 2017. Вып. 2. № 4. С. 37–44.

8. Никитин С.Н., Завалин А.А. Влияние удобрений и биопрепаратов на продуктивность зернопарового севооборота, потоки элементов питания и свойства чернозема выщелоченного в лесостепи Среднего Поволжья // Агрохимия. 2017. № 6. С. 12–29.
9. Яппаров И.А., Газизов Р.Р., Дегтярева И.А., Суханова И.М., Ильясов М.М., Яппарова Л.М., Садеретдинова И.С., Ежкова Д.В. Влияние последействия осадков сточных вод на агрохимические показатели чернозема выщелоченного и урожайность сельскохозяйственных культур // Вестн. технол. ун-та. 2017. Т. 20. № 10. С. 128–131.
10. Габбасова И.М., Гарипов Т.Т., Комиссаров М.А., Мелентьева О.А. Содержание токсичных элементов при внесении фосфогипса и помета в агрочернозем слабоэродированный // Агрохимия. 2023. № 9. С. 50–55.
DOI: 10.31857/S0002188123070050
11. Пахненко Е.П., Ермаков А.В., Убугунов Л.Л. Влияние осадков сточных вод города Улан-Удэ на свойства почвы, продуктивность и качество картофеля // Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2009. № 4. С. 33–39.
12. Володина Т.И., Макарова А.И. Влияние органических систем удобрения на азотный режим дерново-подзолистой почвы и продуктивность севооборота в условиях Северо-Запада России // Агрохимия. 2010. № 8. С. 24–30.
13. Касатиков В.А., Шабардина Н.П. Действие биокомпостов на основе побочной продукции животноводства и городских отходов на агроэкологические свойства дерново-подзолистой почвы // Владимир. земледелец. 2023. № 2(104). С. 30–34.
DOI: 10.24412/2225-2584-2023-2104-30-34
14. Щипцова Н.В., Ларионов Г.А., Мардарьева Н.В. Использование осадков городских сточных вод в качестве удобрения // Вестн. Чуваш. ГАУ. 2022. № 1. С. 32–37.
DOI: 10.48612/vch/5653-nu3k-tu1a
15. Касатиков В.А., Чемерис М.С., Яшин И.М., Пескаров А.А. Последствие внесения ОСВ и известкования на содержание подвижных форм тяжелых металлов в пахотном слое почвы и их транслокацию в растительную продукцию // Плодородие. 2012. № 5. С. 45–47.
16. Фрид А.С., Касатиков В.А., Борисочкина Т.И., Колчанова К.А., Никитина Н.С. Влияние длительного применения осадков сточных вод и извести на валовое содержание и концентрацию подвижных форм тяжелых металлов в супесчаной дерново-подзолистой почве // Агрохимия. 2023. № 1. С. 83–96.
DOI: 10.31857/S0002188123010040
17. Агрохимические методы исследования почв. Коллектив. моногр. / Под ред. А.В. Соколова. М.: Наука, 1975. 656 с.
18. ГОСТ 26212-2021 Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. 10 с.
19. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 62 с.
20. Методические указания по определению мышьяка в почвах фотометрическим методом. М.: ЦИНАО, 1993. 13 с.
21. Саев Ю.Е., Смирнова Р.С. Геохимические принципы выявления зон воздействия промышленных выбросов в городских агломерациях // Ландшафтно-геохимическое районирование и охрана среды. М.: Мысль, 1983. 98 с.
22. ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрения. М.: Стандартинформ, 2008. 7 с.
23. Куликова А.Х., Никитин С.Н., Сайдяшева Г.В. Влияние удобрений на содержание и баланс гумуса в черноземе выщелоченном при возделывании культур в зернопаровом севообороте // Агрохимия. 2017. № 12. С. 7–15.
DOI: 10.7868/S000218811712002X
24. Асылбаев И.Г. Тяжелые металлы второго класса опасности в почвах и породах Южного Урала: запасы и оценка загрязнения // Плодородие. 2015. № 5. С. 58–66.
25. Габбасова И.М., Гарипов Т.Т., Дорогая Е.С., Комиссаров М.А., Назырова Ф.И., Нигматзянов А.С. Влияние осадков сточных вод в сочетании с различными добавками на азотное состояние чернозема выщелоченного // Агрохимия. 2023. № 11. С. 112–116.
DOI: 10.31857/S0002188123110054
26. Глазовская М.А. Методологические основы оценки эколого-геохимической устойчивости почв к техногенным воздействиям. М.: Изд-во МГУ, 1997. 104 с.
27. Белопухов С.Л., Сюняев Н.К., Тютюнькова М.В., Сюняева О.И. Массоперенос никеля в агроэкосистеме с дерново-подзолистой супесчаной почвой при длительном применении осадков сточных вод // Агрохимия. 2017. № 5. С. 86–90.

Content of Heavy Metals in Agrochernozem of the Southern Cis-Urals after Introduction of Sewage Sludge as a Fertilizer

O. A. Melentyeva^a, I. M. Gabbasova^{a, #}, T. T. Garipov^a, I. K. Khabirov^b

^a*Ufa Institute of Biology, UFIC RAS,
prosp. Oktyabrya 69, Ufa 450054, Bashkortostan, Russia*

^b*Ufa experimental station,
ul. Topolinaya 1, Bashkortostan, Ufa district, s. Chernolesovsky 450535, Russia,
#E-mail: gimib@mail.ru*

The study was conducted in the southern forest-steppe of the Republic of Bashkortostan on heavy loamy agrochernozem with a high content of humus, close to a neutral pH, high capacity of cation exchange with a predominance of calcium. Sewage sludge (SS) from Ufa municipal wastewater treatment plants was introduced at a dose of 30 t/ha in the top layer of 0–20 cm of soil. Samples were taken from depths of 0–5, 5–20 and 20–40 cm six months after application. The introduction of SS led to an increase in the content of humus, mineral nitrogen (up to 2.5 times), mobile phosphorus (up to 30%) and exchangeable potassium (up to 12%), as well as the neutralization of the soil solution. At the same time, the content of mobile forms of heavy metals (HM) Mn, Cu, Zn, Co, Pb and Cd did not exceed 16.6% of the model predictive control (MPC), the content of gross forms of As, Zn, Pb, Hg, Cd, Cr, Co, Cu and Mn did not exceed 51% of the MPC, the total chemical index of the HM content was “acceptable” (2.6–10.2). Only the concentration of Ni, which was 0.75 MPC in the background soil, increased to 0.8 MPC. Consequently, the nickel content was a limiting factor in the introduction of SS, and it was a key element for monitoring the content of HM in soils.

Keywords: agrochernozem, sewage sludge (SS), heavy metals (HM), total chemical index.