

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД НА СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВЕ И РАСТЕНИЯХ

М.Т. Васбиева, к.б.н., Д.С. Зиновьев, Пермский НИИСХ

Представлены результаты полевого опыта по влиянию внесения осадков сточных вод (ОСВ) на накопление тяжёлых металлов в дерново-подзолистой почве Предуралья и поступления их в растения. Установлено, что длительное внесение ОСВ в дозе 40 т/га один раз в ротацию полевого севооборота не приводит к накоплению тяжёлых металлов в почве и выращенной сельскохозяйственной продукции выше ПДК.

Ключевые слова: ОСВ, тяжёлые металлы, дерново-подзолистая почва, полевые культуры.

При использовании осадков сточных вод в почву неизбежно попадают тяжелые металлы (ТМ), в том числе и наиболее опасные из них – кадмий, свинец, ртуть, цинк, медь и др. Для нормирования поступления ТМ в почву при внесении ОСВ разработаны специальные ограничения на их содержание – ГОСТ Р 17.4.3.07 – 2001 [1]. Однако, даже если концентрация элементов в осадках меньше установленных нормативов, потенциальная опасность загрязнения почвы и продукции существует. Поэтому в почве, где регулярно вносят ОСВ, необходим постоянный контроль за содержанием ТМ [2]. При использовании осадков в почве меняются не только общее содержание, но и подвижность, а также фракционный состав элементов. Масштабы этого процесса зависят от дозы и состава внесенных ОСВ, а также химических свойств почвы. По характеристике подвижности ТМ в осадках нельзя судить о потенциальном их поведении в почве, так как ионы металлов, взаимодействуя с органическими и минеральными компонентами почвы, образуют новые, более прочносвязанные или, наоборот, более подвижные соединения [3–7].

Цель исследований – выявить влияние применения ОСВ на содержание в почве ТМ и оценить уровень поступления их в растения.

Методика. Экспериментальная работа проведена в 2007–2011 гг. на базе опытного поля Пермского НИИСХ в длительном стационарном опыте, заложенном в 1976 г. Почва опытного участка дерново-мелкоподзолистая тяжелосуглинистая.

Агрохимическая характеристика почвы на момент закладки опыта: гумус – 2,2 %, подвижный P_2O_5 – 154, обменный K_2O – 170 мг/кг, pH_{KCl} 4,8, Hg – 3,7 и S – 18,1 мг-экв/100 г.

В схему опыта были включены варианты, где изучали влияние ОСВ при систематическом внесении в дозе 40 т/га в I, II, III, IV и V (1976–2012 гг.) ротациях севооборота и в последствии, где ОСВ в дозах 40 и 60 т/га были внесены в I и II (1976–1992 гг.) ротациях. Использование ОСВ изучали как в чистом виде, так и на фоне минеральных удобрений – $N_{60}P_{60}K_{60}$. Наблюдения проводили в 7-польном полевом севообороте с чередованием культур: чистый пар, озимая рожь, яровая пшеница с подсевом клевера, клевер 1-го г.п., клевер 2-го г.п., ячмень, овес. ОСВ вносили в чистом пару, минеральные удобрения под все зерновые культуры севооборота. Содержание ТМ в почве, растениях и удобрениях определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии.

В опытах использовали осадки сточных вод биологических очистных сооружений г. Перми. ОСВ, применяемые в опыте, по содержанию ТМ соответствовали требованиям ГОСТ Р 17.4.3.07–2001.

Валовое содержание тяжелых металлов в ОСВ, мг/кг (усреднённые данные), приведено ниже.

Удобрение	Cd	Pb	Zn	Cu	Ni	Cr	As	Hg
ОСВ	21	43	224	242	273	648	8	1

Результаты исследований и их обсуждение. Пятикратное внесение ОСВ (V ротации) достоверно повысило в пахотном горизонте почвы содержание валовых форм Cd в 2,7, Pb в 1,5, Hg в 1,7, Zn и Cu в 1,1 раза (табл. 1). Также изменился уровень подвижных (вытяжка ААБ) или доступных для растений форм ТМ, их количество превысило показатель контрольного варианта в 1,8–6,0 раз. Уровень кислоторастворимых форм (вытяжка 1 моль/л HCl), потенциально доступных для растений, повысился в 2,1–4,4 раза. Однако полученные результаты были ниже допустимых концентраций – ПДК или ОДК [8–9].

1. Влияние длительного применения ОСВ на накопление подвижных, кислоторастворимых и валовых форм тяжёлых металлов в пахотном горизонте дерново-подзолистой почвы (V ротация, 2008 г.)

Вариант опыта	Hg	Cd			Pb			Zn			Cu			Z _c		
	3**	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Контроль	0,03	0,09	0,17	0,21	0,3	2,2	6,7	1,2	5,5	43,3	0,4	7,0	18,6	–	–	–
ОСВ 40 т/га*	0,05	0,32	0,37	0,57	0,7	4,3	10,0	7,2	24,0	46,8	0,7	14,4	19,9	10,6	7,6	4,0
ПДК (ОДК)	2,1	–	1	1	6	60	65	23	60	110	3	50	66	–	–	–
HCP_{05}	0,01	0,05	0,1	0,1	0,2	0,5	1,5	0,5	1,9	4,0	0,2	1,1	1,3	–	–	–

*ОСВ (натуральной влажности) вносили в I, II, III, IV и V ротациях севооборота.

**1 – содержание подвижных форм элемента; 2 – содержание кислоторастворимых форм элемента; 3 – содержание валовых форм элемента.

По значениям коэффициента концентрации K_c (отношение концентрации элемента в варианте опыта к контролю) в варианте с ОСВ для валовых форм составлен следующий убывающий ряд элементов: $Cd > Hg > Pb > Cu > Zn$. Согласно этому ряду, в пахотном горизонте почвы под действием ОСВ в максимальной степени накапливались валовые формы Cd, Hg и Pb и в меньшей степени Zn и Cu. Для подвижных форм был выделен другой убывающий ряд элементов: $Zn > Cd > Pb > Cu$. Следовательно, внесение ОСВ в большей степени оказало влияние на подвижность в почве Zn и Cd.

В условиях наблюдаемого загрязнения почвенного покрова несколькими ТМ ориентировочно оценить возможный отрицательный эффект совместно производимый элементами-загрязнителями, позволяет показатель суммарного загрязне-

ния – Z_c [10–12]. В варианте с систематическим внесением ОСВ Z_c варьировал от 4,0 до 10,6 (в зависимости от формы ТМ), что свидетельствует о наиболее слабом загрязнении почвы и считается допустимым.

В вариантах, где ОСВ в дозах 40 и 60 т/га были внесены более 20 лет назад, в почве изучали кислоторастворимые формы Cd, Pb, Zn и Cu. Содержание Pb в почве было выше контрольного варианта в 1,8–1,9, Zn в 3,5–4,0 и Cu в 3,0–3,6 раза (контроль – 1,6, 4,8 и 4,5 мг/кг соответственно), но не превысило допустимых нормативов. Концентрация Cd возросла в 3,4–5,0 раз и в варианте ОСВ 60 т/га** превысило значение ПДК (1,0 мг/кг) на 0,45 мг/кг, что можно объяснить высоким содержанием данного элемента в самих ОСВ. Осадки, внесенные в 1976 г. содержали Cd от 60 до 150 мг/кг. На

биологические очистные сооружения в этот период поступали не только стоки коммунально-бытового хозяйства, но и значительная доля промышленных сточных вод. При систематическом внесении ОСВ нет превышения по Cd, т.к. возможно дополнительное внесение органического вещества приводит к закреплению его в почве, переводу в труднодоступные соединения.

Ежегодное внесение под зерновые культуры в течение четырёх ротаций севооборота минеральных удобрений ($N_{60}P_{60}K_{60}$) увеличило количество кислоторастворимых форм ТМ в пахотном горизонте по сравнению с контролем в 1,8-3,2 раза. Минеральные удобрения могли оказать прямое действие на содержание ТМ, т.к. сами являются их источником, и косвенное – через подкисление почвы в результате их применения. На фоне $N_{60}P_{60}K_{60}$ в вариантах с ОСВ (систематическое внесение, последствие) отмечено увеличение кислоторастворимых форм Cd выше ПДК.

Характер накопления полевыми культурами ТМ зависит от уровня содержания ТМ в почве, свойств почвы и элементов, видов и доз применяемых удобрений, а также биологических особенностей вида растений и погодных условий вегетационного периода. Так в зерне яровой пшеницы в контрольном варианте концентрация Cd, Zn и Cu была выше, чем у озимой ржи в 1,5-2,0 раза, в соломе в 1,1-1,7 раза (табл. 2). Следует также отметить, что Zn и Cd в большей степени накапливались в зерне культур, а Pb и Cu в соломе.

2. Влияние длительного применения ОСВ на содержание тяжелых металлов в растениях озимой ржи и яровой пшеницы, мг/кг в.с.в.

Вариант опыта	Озимая рожь (2008 г.)				Яровая пшеница (2009 г.)			
	Cd	Pb	Zn	Cu	Cd	Pb	Zn	Cu
Контроль (без удобрений)	0,04 0,03	0,36 0,68	24,3 9,4	3,4 4,9	0,08 0,05	0,34 0,70	37,4 10,0	7,0 5,8
ОСВ 40 т/га*	0,04 0,03	0,30 0,72	33,3 13,1	4,4 10,7	0,09 0,05	0,29 0,70	38,3 27,1	6,9 11,7
НСП ₀₅	Фф <Фт	0,10 <Фт	2,8 1,9	1,0 1,1	0,02 <Фт	0,10 <Фт	3,5 4,3	1,0 1,7
ПДК МДУ	0,1 0,3	0,5 5,0	50 50	10 30	0,1 0,3	0,5 5,0	50 50	10 30

*ОСВ (натуральной влажности) вносили в I, II, III, IV и V ротациях севооборота.

Над чертой – содержание ТМ в зерне, под чертой – в соломе.

При внесении ОСВ в чистом пару V ротации (2007 г.) в зерне озимой ржи достоверно повысилось содержание Zn и Cu, у яровой пшеницы – на уровне тенденции Zn и Cd. В зерне обеих культур на 15-17 % снизилось количество Pb (на уровне тенденции). Известно, что поглощение Pb растениями происходит в довольно пассивной форме, здесь хорошо действует система инактивации Pb корневой системой [7, 13]. Поэтому даже увеличение Pb в почве (до определённых границ) может существенно не повлиять на повышение содержания элемента в растении. Также Pb прочнее других ТМ связывается гумусом почвы. Кроме того, возможен эффект «биологического разбавления», заключающийся в распределении токсичных элементов в большем объеме полученного урожая. Следовательно, применяя ОСВ с примесями ТМ необходимо стремиться к созданию оптимальных условий для роста растений. В соломе зерновых культур существенно возросло содержание Zn и Cu, количество Cd и Pb сохранилось на уровне контроля.

Содержание ТМ в зерне и соломе озимой ржи и яровой пшеницы при регулярном внесении ОСВ находилось в пределах допустимых уровней ПДК и МДУ, следовательно полученный урожай может быть использован, как на продовольственные, так и на кормовые цели.

В вариантах, где изучали последствие ОСВ в дозах 40 и 60 т/га, которые вносили в I и II ротациях севооборота, определяли содержание ТМ в зерне яровой пшеницы. Содержание Pb, Zn и Cu в зерне пшеницы существенно не отличалось от контроля, изменения находились на уровне тенденций. Увеличение содержания Cd в почве в данных вариантах выше ПДК соответственно привело к его накоплению и в расти-

тельной продукции. Концентрация Cd в зерне пшеницы возросла с 0,08 до 0,13 мг/кг. Cd обладает высокой аккумулятивной способностью, легко перемещается из корней в надземные органы, в больших количествах проникает в репродуктивные органы, и, являясь химическим аналогом Zn, способен замещать его в сложных метаболических процессах. Уже в контрольном варианте содержание Cd в зерне яровой пшеницы составило 0,08 мг/кг, тогда как его допустимый уровень равен 0,10 мг/кг. Считается, что Cd даже при низком содержании в почве накапливается в кормах и продуктах питания, особенно на кислых дерново-подзолистых почвах [14]. Содержание Cd в зерне пшеницы превысило допустимый уровень, но было ниже, чем МДУ для кормов, т.е. данную продукцию можно использовать только на зернофураж.

На фоне $N_{60}P_{60}K_{60}$ в зерне пшеницы в варианте с систематическим внесением ОСВ содержание Cd возросло с 0,08 (фон) до 0,10 мг/кг, в вариантах, где изучали последствие ОСВ, – до 0,15 мг/кг, что превысило допустимый уровень, но было ниже, чем МДУ.

Наиболее высокое поступление тяжёлых металлов по сравнению с зерновыми культурами было отмечено в растениях клевера лугового, их содержание (в контрольном варианте) превышало данные показатели в зерне и соломе в 1,3-4,3 раза (табл. 3). Применение ОСВ как при систематическом внесении (I-V ротации), так и при изучении последствие (I-II ротации) привело к повышению в растениях клевера содержания Cd в 1,1-1,2 (по отношению к контролю), Zn в 1,4-1,6 и Cu в 1,1 раза.

Использование ОСВ не однозначно повлияло на концентрацию Pb в растениях. В варианте с регулярным внесением ОСВ 40 т/га отмечено достоверное снижение содержания Pb на 18 %, а при изучении последствие (ОСВ 40 и 60 т/га**) наблюдали тенденцию к увеличению на 9 %, в то время как в почве концентрация подвижных и кислоторастворимых форм данного элемента была выше контрольного варианта в 1,4-2,3 раза.

Содержание ТМ в клевере при внесении ОСВ (систематическое, последствие) находилось в пределах, установленных МДУ, т.е. полученный урожай может быть использован на кормовые цели.

Применение минеральных удобрений – $N_{60}P_{60}K_{60}$ (под зерновые культуры севооборота) существенно не повлияло на содержание в клевере Cd, Zn, Cu и достоверно снизило концентрацию Pb. Систематическое внесение ОСВ в дозе 40 т/га на фоне $N_{60}P_{60}K_{60}$ привело к увеличению в клевере содержания Cd в 1,1 и Zn в 1,7 раза (к фону). По Zn отмечено превышение допустимых нормативов для кормов сельскохозяйственных животных – МДУ (50 мг/кг), что возможно связано с высокой металлоаккумулирующей способностью клевера лугового к данному элементу, т.к. содержание Zn в использованных ОСВ и в почве было в пределах установленных нормативов. Концентрации Cu и Pb находились на уровне фона. В вариантах, где изучали на фоне минеральных удобрений последствие ОСВ, наблюдали увеличение в растениях клевера ТМ в 1,1-2,2 раза, но превышения допустимых нормативов не выявлено.

3. Влияние ОСВ на содержание тяжелых металлов в клевере луговом (2010 – 2011 гг.), мг/кг в.с.в.

Варианты опыта	Cd	Pb	Zn	Cu
Контроль (без удобрений)	0,10	0,92	31,50	14,65
ОСВ 40 т/га*	0,11	0,75	44,00	16,75
ОСВ 40 т/га**	0,12	1,00	45,00	16,50
ОСВ 60 т/га**	0,12	1,00	49,00	15,10
$N_{60}P_{60}K_{60}$ – фон	0,10	0,75	31,63	14,65
Фон + ОСВ 40 т/га*	0,11	0,75	55,00	14,75
Фон + ОСВ 40 т/га**	0,11	1,66	39,00	15,50
Фон + ОСВ 60 т/га**	0,11	1,00	36,50	16,00
НСП ₀₅	0,01	0,15	6,5	1,35
МДУ	0,3	5,0	50	30

*ОСВ (натуральной влажности) вносили в I, II, III, IV и V ротациях севооборота. **ОСВ (натуральной влажности) вносили в I и II ротациях севооборота.

Таким образом, систематическое внесение ОСВ в течение пяти ротаций севооборота увеличило в пахотном горизонте дерново-подзолистой почвы содержание валовых форм тяжёлых металлов (Hg, Cd, Pb, Zn, Cu) в 1,1-2,7 раза, кислоторастворимых и подвижных форм (Cd, Pb, Zn, Cu) в 2,1-4,4 и 1,8-6,0 раза, но превышение ПДК и ОДК не отмечено. Увеличилась подвижность Zn и Cd. Увеличение концентрации ТМ в почве при внесении ОСВ привело к их накоплению и в растениях. Однако содержание Cd, Pb, Zn и Cu в растениях озимой ржи, яровой пшеницы и клевера лугового при регулярном внесении ОСВ находилось в пределах допустимых уровней и МДУ.

Литература

1. ГОСТ Р 17.4.3.07 – 2001. Требования к осадкам сточных вод при использовании их в качестве удобрений. – М.: Издательство стандартов, 2001. 2. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Ладонин Д.В. Экологические нормативы на нетрадиционные органические удобрения // Химия в сельском хозяйстве. – 1995. – № 5. – С. 35-37. 3. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. – Л., 1987. – 142 с. 4. Касатиков В.А. Влияние осадков городских сточных вод на микроэлементный состав почвы // Почвоведение. – 1991. – № 9. – С. 41-49. 5. Кутукова Ю.Д., Плеханова И.О. Влияние мелиорантов на состояние тяжелых металлов в

почвах и содержание их в растениях при использовании осадков сточных вод в качестве удобрения // Агрохимия. – 2002. – № 12. – С. 68-74. 6. Плеханова И.О., Кутукова Ю.Д., Обухов А.И. Накопление тяжелых металлов сельскохозяйственными растениями при внесении осадков сточных вод // Почвоведение. – 1995. – № 12. – С. 1530-1535. 7. Минеев В.Г., Анциферова Е.Ю., Большие Т.Н., Касатиков В.А. Распределение кадмия и свинца в профиле дерново-подзолистой почвы при длительном удобрении ее осадками сточных вод // Агрохимия. – 2003. – № 1. – С. 45-49. 8. ГН 2.1.7.2041-06 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве». – М.: Информац.-издат. центр Госкомсанэпиднадзора России, 2006. 9. ГН 2.1.7. 2511 – 09 «Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве». – М.: Информац.-издат. центр Госкомсанэпиднадзора России, 2009. 10. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. – 61 с. 11. Титова В.И., Дабахов М.В., Дабахова Е.В. Практикум по агроэкологии. – Н. Новгород: Волго-Вятская гос. служба, 2005. – 138 с. 12. Ильин В.Б. Оценка существующих экологических нормативов содержания тяжелых металлов в почве // Агрохимия. – 2000. – № 9. – С. 74-79. 13. Тяжелые металлы в системе почва – растения – удобрения / Под ред. М.М. Овчаренко. – М., 1997. – 290 с. 14. Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах / Под ред. Н.Г. Зырина и Л.К. Садовниковой. – М.: МГУ, 1985. – 208 с.

EFFECT OF LONG-TERM USE OF SEWAGE SLUDGE ON THE CONTENTS OF HEAVY METALS IN SOIL AND PLANTS

M.T. Vasbieva, D.S. Zinoviev

Perm Agricultural Scientific Research Institute, ul Cultury 12, Lobanovo, Perm raion, 614532 Russia, E-mail: vasbieva@mail.ru

The effect of sewage sludge application on the accumulation of heavy metals in soddy-podzolic soil of Cisural and their entry in the plants has been studied in a field experiment. It has been found that the long-term use of sewage sludge at a rate of 40 t/ha once every cycle of seven-field crop rotation does not lead to the accumulation of heavy metals in the soil and crops above the MPC level.

Keywords: sewage sludge, heavy metals, soddy-podzolic soil, field crops.