

ПОСЛЕДЕЙСТВИЕ ВНЕСЕНИЯ ОСВ И ИЗВЕСТКОВАНИЯ НА СОДЕРЖАНИЕ ПОДВИЖНЫХ ФОРМ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПАХОТНОМ СЛОЕ ПОЧВЫ И ИХ ТРАНСЛОКАЦИЮ В РАСТИТЕЛЬНУЮ ПРОДУКЦИЮ

В.А. Касатиков, д.с.-х.н., ВНИИОУ, М.С. Чемерис, д.б.н., НГАУ, И.М. Яшин, д.б.н., А.А. Пескарев, РГАУ-МСХА

Представлены данные исследования агроэкологического состояния агроценоза при применении различных доз ОСВ и известкования. Рассмотрены подвижность тяжелых металлов в почве и содержание экотоксикантов в полученной растительной продукции.

Ключевые слова: осадки сточных вод, тяжелые металлы, загрязнение почвы, транслокация, известкование.

Антропогенная деятельность, особенно в сфере сельскохозяйственного производства при нарушении агротехнологий, может привести к загрязнению окружающей среды. К загрязнителям почв часто можно отнести удобрения, в первую очередь осадки сточных вод (ОСВ), являющиеся источниками поступления тяжелых металлов (ТМ) в агроэкосистемы [7]. Поэтому для безопасного применения ОСВ в качестве органического удобрения в разных почвенно-экологических условиях необходим дифференцированный подход к оценке доз их внесения, влияния на почву, растения, грунтовые воды.

Содержание ТМ в осадках колеблется в широких пределах и в ряде случаев может превышать допустимые концентрации. Это может стать ограничивающим фактором при утилизации осадков сточных вод в качестве удобрения.

Наибольшую опасность представляют подвижные формы ТМ, т.е. наиболее доступные для живых организмов. Подвижность же зависит от почвенно-экологических факторов, основные из них – содержание органического вещества, кислотность почвы, окислительно-восстановительные условия, гранулометрический состав и плотность почвы [2].

С агрономической и экологической точек зрения необходимы такие приемы возделывания культур, которые одновременно способствовали бы снижению поступления ТМ в растения и уменьшению их содержания в корнеобитаемом слое почвы. Так, при известковании кислых почв кадмий, ртуть, свинец, кобальт, никель и другие ТМ образуют слаборастворимые гидроксиды и карбонаты. Ограниченная подвижность и доступность металлов растениям приводят в этих условиях к снижению их содержания в продукции, но одновременно увеличивают степень загрязнения почвы вследствие ослабления миграционных потоков [1].

Необходим дифференцированный подход к применению ОСВ в качестве удобрения, так как они индивидуальны по составу. В связи с этим для оптимального использования ОСВ необходимо в каждом конкретном регионе определять их влияние на почву, продуктивность и качество сельскохозяйственных культур [8].

Методика. В 2006-2010 гг. на базе длительного стационарного опыта во ВНИИОУ проводили исследования по изучению поведения ТМ в системе почва – растение. В 2008-2009 гг. изучали последствие внесения некоторых доз ОСВ и известкования на содержание подвижных форм ТМ в пахотном слое почвы и их транслокацию в растительную продукцию (ячмень сорта Зазерский 85, овес сорта Анастасия).

Почва опытного участка дерново-подзолистая, сформированная на двучленных ледниковых отложениях. Пахотный и иллювиально-железистый горизонты находятся в толще кроющих отложений, подстилаемых суглинистой остаточнокорбанатной мореной.

Многолетний двухфакторный опыт был заложен в 1984 г. Почва опыта загрязнена ТМ в результате систематического внесения с 1984 г. механически обезвоженных и аэробно-стабилизированных ОСВ г. Владимира в дозах 15, 30, 60, 120 т/га (50% влажности) в качестве органического удобрения. За весь период исследований суммарные дозы ОСВ составили

150, 300, 600, 1200 т/га. Известкование проводили доломитовой мукой в дозах 3, 6, 9 т/га один раз за ротацию севооборота в 1984, 1990, 1995 гг. В 2006 г. были внесены ОСВ и доломитовая мука согласно схеме:

1) Контроль (без удобрений); 2) ОСВ, 150 т/га + известь, 3 т/га; 3) ОСВ, 300 т/га + известь, 3 т/га; 4) ОСВ, 600 т/га + известь, 3 т/га; 5) ОСВ, 1200 т/га + известь, 3 т/га; 6) ОСВ, 150 т/га + известь, 6 т/га; 7) ОСВ, 300 т/га + известь, 6 т/га; 8) ОСВ, 600 т/га + известь, 6 т/га; 9) ОСВ, 1200 т/га + известь, 6 т/га; 10) ОСВ, 150 т/га + известь, 9 т/га; 11) ОСВ, 300 т/га + известь, 9 т/га; 12) ОСВ, 600 т/га + известь, 9 т/га; 13) ОСВ, 1200 т/га + известь, 9 т/га.

Повторность опыта 6-кратная. Размер делянок: 1,5 м × 2 м (3 м²).

Чередование культур в 2006-2010 гг.: горчица белая – озимая пшеница – ячмень – овес – горчица белая.

Агротехника ячменя и овса общепринятая для центрального района Нечерноземной зоны. Обработку почвы осуществляли в соответствии с методикой проведения мелкоделяночных опытов.

Все работы выполняли вручную в соответствии с методикой закладки и проведения полевых мелкоделяночных опытов.

В образцах почв определяли подвижные формы ТМ после экстракции 1 М ацетат-аммонийным буфером с pH 4,8 (соотношение почва : экстракт – 1:2,5). В воздушно-сухих образцах зерна определяли содержание ТМ после мокрого озоления в концентрированной HNO₃ с добавлением H₂O₂ [5].

Для характеристики степени загрязнения почвы ТМ (подвижная форма) использовали нормативы ПДК [6], хотя методически это требует более полного обоснования [10].

Кроме того, использовали индекс суммарного загрязнения почвы Z_c, рассчитанный по формуле: $Z_c = \sum K_c - (n - 1)$, где K_c – коэффициент концентрации элемента, определяемый отношением его содержания в загрязненной почве к фоновому; n – число определяемых элементов с K_c > 1 [3].

Для установления зависимости содержания ТМ в почве и растительной продукции использовали корреляционный анализ; достоверность рассчитанных коэффициентов определяли относительно уровня доверительной вероятности t 0,95 [4].

Результаты и их обсуждение. В ходе экспериментальных исследований 2008-2009 гг. провели анализ содержания ТМ в пахотном слое почвы и растительной продукции по последствию ОСВ 300 и 1200 т/га с внесением доломитовой муки в дозе 3 и 6 т/га, условно обозначив их за варианты 1-5.

По значениям K_c для почвы вариантов 2 и 4 (табл. 1) выделен следующий убывающий ряд элементов: Cu>Cd>Cr>Ni>Zn>Pb. Согласно этому ряду по последствию ОСВ 300 т/га в сочетании с минимальной дозой известкования в максимальной степени повышается содержание в пахотном слое почвы подвижной формы Cu, а в минимальной – Pb. Это обусловлено низким фоновым содержанием Cu в дерново-подзолистой почве опытного участка и повышенной его концентрацией в ОСВ. По последствию максимальных доз ОСВ на вариантах 3 и 5 ряд K_c изменяется: Cd>Cu>Cr>Ni>Zn>Pb. Выявленная зависимость связана с повышением подвижности Cd и Zn в условиях максимальной насыщенности пахотного слоя осадком, снижающем миграционную активность Cd и Zn по почвенному профилю.

1. Влияние последствий ОСВ и известкования на содержание подвижных форм ТМ в пахотном слое почвы (2008-2009 гг.)

Вариант опыта	Элемент						Zc	C _{орг.} , %	pH _{сол.}
	Cd	Cu	Cr	Ni	Pb	Zn			
2008 г.									
1.Контроль	0,15	0,21	0,26	0,72	0,54	2,78	-	0,98	6,50
2.ОСВ, 300 т/га +д. мука, 3 т/га	<u>0.45</u> 3,0	<u>0.90</u> 4,28	<u>0.45</u> 2,50	<u>0.86</u> 1,19	<u>0.61</u> 1,13	<u>2.93</u> 1,05	8,2	1,26	6,60
3.ОСВ, 1200 т/га+д. мука, 3 т/га	<u>1.64</u> 10,9	<u>2.02</u> 9,61	<u>1.34</u> 5,15	<u>2.83</u> 3,93	<u>1.25</u> 2,31	<u>10.08</u> 3,62	30,5	1,89	6,68
4.ОСВ, 300 т/га+д. мука, 6 т/га	<u>0.75</u> 5,0	<u>1.06</u> 5,04	<u>0.79</u> 3,03	<u>2.11</u> 2,93	<u>0.81</u> 1,5	<u>4.79</u> 1,72	14,2	1,19	6,65
5.ОСВ, 1200 т/га+д. мука, 6 т/га	<u>1.91</u> 12,7	<u>2.14</u> 10,2	<u>1.41</u> 5,42	<u>3.22</u> 4,47	<u>1.32</u> 2,44	<u>12.52</u> 4,50	34,7	1,83	6,70
ПДК [6], мг/кг	0,5*	3,0	6,0	4,0	6,0	23,0	-	-	-
2009 г.									
1.Контроль	0,17	0,26	0,24	0,51	0,22	1,26	-	0,86	6,61
2.ОСВ, 300 т/га +д. мука, 3 т/га	<u>0.39</u> 2,3	<u>0.95</u> 3,6	<u>1.19</u> 5,0	<u>0.71</u> 1,4	<u>0.38</u> 1,7	<u>1.34</u> 1,1	10,1	1,00	6,59
3.ОСВ, 1200 т/га +д. мука, 3 т/га	<u>1.53</u> 9,0	<u>1.47</u> 5,6	<u>1.32</u> 5,5	<u>2.86</u> 5,6	<u>0.70</u> 3,2	<u>1.48</u> 1,2	25,1	1,51	6,61
4.ОСВ, 300 т/га +д. мука, 6 т/га	<u>0.42</u> 2,5	<u>1.08</u> 4,1	<u>1.27</u> 5,3	<u>0.84</u> 1,7	<u>0.42</u> 1,9	<u>1.36</u> 1,1	11,6	1,02	6,67
5.ОСВ, 1200 т/га +д. мука, 6 т/га	<u>1.37</u> 8,1	<u>1.36</u> 5,2	<u>1.31</u> 5,5	<u>2.63</u> 5,2	<u>0.67</u> 3,0	<u>1.51</u> 1,2	23,2	1,54	6,64
ПДК [6], мг/кг	0,5*	3,0	6,0	4,0	6,0	23,0	-	-	-

*ОДК валового содержания кадмия в песчаной и супесчаной почве [6].

Примечание. В числителе – концентрация ТМ, мг/кг, в знаменателе – Кс.

Известкование, способствуя закреплению гумусовых соединений в пахотном слое почвы, благоприятно отражается на ее агрохимических показателях. Однако, предполагая связь ТМ с органическим веществом осадков, можно заключить, что внесение извести способствует накоплению и элементов-загрязнителей.

И действительно, в климатических условиях 2008 г. последствие только известкования на фоне последствий ОСВ 300 и 1200 т/га в суммарном исчислении способствовало повышению индекса суммарного загрязнения почвы (Zc) на вариантах 4 и 5 в сравнении с вариантами 2 и 3, соответственно, в 1,74 и 1,13 раз.

С помощью корреляционного анализа выявлена тесная положительная зависимость концентрации подвижных форм металлов в почве с содержанием органического вещества для всех исследуемых элементов: достоверные коэффициенты корреляции для Cr, Cd, Ni, Zn и Pb составили $r = 0,99-0,94$, а для Cu $r = 0,70$ (связь не достоверна для $t = 0,95$). Тесной достоверной зависимости содержания этих элементов от кислотности почвы не выявлено. По показателю Zc вариант 5 имеет высоко опасную, вариант 3 – умеренно опасную, а варианты 2 и 4 – допустимую степень загрязнения почвы [3]. Из группы ТМ только содержание подвижного кадмия превысило ПДК от 1,5 (ОСВ 300 т/га + 6 т/га извести) до 3-4 раз по последствие максимальной дозы осадка.

В 2009 г. по последствие ОСВ 300 т/га ТМ по величине Кс расположились в следующий убывающий ряд $Cr > Cu > Cd > Pb > Ni > Zn$. С увеличением дозы известкования с 3 до 6 т/га наблюдалось некоторое повышение содержание подвижных

форм всех элементов, о чем свидетельствуют значения Zc (см. табл. 1).

По последствие максимальной дозы ОСВ в почве заметно выше содержание подвижных форм кадмия ($Kc = 8-9$) и никеля ($Kc = 5,2-5,6$). По Кс ряды элементов для доз известкования 3 и 6 т/га таковы: $Cd > Cu > Ni > Cr > Pb > Zn$ и $Cd > Cr > Cu > Ni > Pb > Zn$ соответственно. Известкование по последствие максимальной дозы ОСВ в целом способствовало снижению Zc с 25 до 23 ед.

По отношению к 2008 г. по последствие ОСВ, 300 т/га + 3 т/га извести наблюдалось увеличение Zc с 8,2 до 10,1 ед., или на 25 %. На остальных вариантах Zc снизился: на вариантах 3 и 4 на 18 %, а на варианте 5 – на 33 % вследствие выноса ТМ предыдущей культурой и водной миграции за корнеобитаемый слой почвы.

С помощью корреляционного анализа выявлена тесная положительная зависимость концентрации подвижных форм металлов в почве с содержанием органического вещества для всех исследуемых элементов: достоверные коэффициенты корреляции для Cd, Zn, Ni и Pb составили $r = 0,99-0,98$, для Cu $r = 0,89$, а для Cr при $r = 0,64$ связь оказалась не достоверной. В условиях опыта не обнаружено зависимости содержания этих элементов от кислотности почвы.

По показателю Zc варианты 3 и 5 имеют умеренно опасную, а варианты 2 и 4 – допустимую степень загрязнения почвы [3]. В изучаемой группе ТМ только содержание кадмия по последствие ОСВ 1200 т/га превысило ПДК в 3 раза. Данные по выносу тяжелых металлов урожаем изучаемых культур при различных дозах ОСВ и известкования приведены в таблице 2.

2. Содержание ТМ в полученной растительной продукции и регламентируемые показатели МДУ (зерно/зернофураж), мг/кг [6]

Вариант	Зерно ячменя (2008 г.)						Зерно овса (2009 г.)					
	Cd	Cu	Cr	Ni	Pb	Zn	Cd	Cu	Cr	Ni	Pb	Zn
1	<u>0,031</u> 0,21	<u>4,14</u> 19,75	<u>0,74</u> 2,85	<u>1,06</u> 1,47	<u>0,35</u> 0,65	<u>18,08</u> 6,5	<u>0,025</u> 0,15	<u>1,37</u> 5,27	<u>1,21</u> 5,04	<u>1,08</u> 2,12	<u>0,69</u> 3,14	<u>11,82</u> 9,38
2	<u>0,054</u> 0,12	<u>4,79</u> 5,32	<u>0,81</u> 1,8	<u>1,07</u> 1,24	<u>0,39</u> 0,64	<u>21,70</u> 7,41	<u>0,037</u> 0,09	<u>1,59</u> 1,67	<u>1,27</u> 1,07	<u>1,28</u> 1,8	<u>0,64</u> 1,68	<u>13,46</u> 10,05
3	<u>0,069</u> 0,04	<u>5,62</u> 2,78	<u>1,06</u> 0,79	<u>1,08</u> 0,38	<u>0,41</u> 0,33	<u>27,34</u> 2,71	<u>0,036</u> 0,02	<u>1,34</u> 0,91	<u>0,9</u> 0,68	<u>2,18</u> 0,76	<u>0,53</u> 0,75	<u>13,84</u> 9,35
4	<u>0,040</u> 0,05	<u>4,95</u> 4,67	<u>0,96</u> 1,22	<u>0,93</u> 0,44	<u>0,33</u> 0,41	<u>20,35</u> 4,25	<u>0,059</u> 0,14	<u>1,51</u> 1,4	<u>2,91</u> 2,29	<u>1,81</u> 2,15	<u>0,86</u> 2,05	<u>13,50</u> 9,93
5	<u>0,060</u> 0,03	<u>5,89</u> 2,75	<u>1,02</u> 0,72	<u>1,07</u> 0,33	<u>0,37</u> 0,28	<u>29,35</u> 2,34	<u>0,025</u> 0,02	<u>1,92</u> 1,41	<u>1,23</u> 2,24	<u>2,43</u> 0,92	<u>0,92</u> 1,37	<u>12,49</u> 8,28
МДУ	0,3	30,0	0,5	1	5	50	0,3	30,0	0,5	1	5	50

Примечание. В числителе – концентрация ТМ, мг/кг;

в знаменателе – коэффициент биологического накопления ТМ генеративной частью растений.

Основными загрязнителями были Сг и Ni. Практически на всех вариантах включая контроль, содержание данных экотоксикантов в зерне ячменя превышало МДУ для кормов (зернофураж), кроме 4-го варианта по никелю. Однако у последующей культуры превышение регламентируемого показателя по хромю (примерно в 6 раз по 4-му варианту) и никелю (до 2,5 раз по 5-му варианту) оказалось более существенным. Кроме того, зерно овса интенсивней накапливало свинец, чем зерно ячменя. Полученные данные согласуются с исследованиями ВИА на Центральной опытной станции по изучению способности

различных сельскохозяйственных культур к накоплению тяжелых металлов [9]. Выяснилось, что из всех зерновых культур ячмень и озимая пшеница накапливают минимальное количество загрязнителей, а у овса способность к накоплению токсикантов увеличивается.

В таблице 3 представлены данные о продуктивности изучаемых культур и влиянию последствия ОСВ и известкования на содержание подвижного фосфора и обменного калия в пахотном слое почвы.

3. Урожайность изучаемых культур и обеспеченность пахотного слоя почвы подвижными формами фосфора и обменным калием

Вариант опыта	Урожайность зерна, ц/га		Прибавка к контро- лю, %		P ₂ O ₅ подви.		K ₂ O обм.	
					мг/100 г почвы			
	1	2	1	2	1	2	1	2
1.Контроль	8,4	25,0	-	-	47,9	33,4	4,4	3,2
2.ОСВ 300 т/га +д. мука 3 т/га	11,6	27,6	38,0	10,4	84,0	51,2	4,5	3,4
3.ОСВ 1200 т/га+д. мука 3 т/га	9,4	32,0	12,0	28,0	184,8	152,7	5,5	3,9
4.ОСВ 300 т/га +д. мука 6 т/га	12,6	27,0	50,0	8,0	92,4	66,5	4,7	3,1
5.ОСВ 1200 т/га+д. мука 6 т/га	11,0	31,0	31,0	8,0	226,8	155,2	4,9	3,5
HCP _{0,95} , ц/га	0,62	2,4						
P. %	1,38	1,9						

Примечание. 1 – ячмень, 2008 г., 2 – овес, 2009 г.

Заключение. При изучении последствия ОСВ и известкования на содержание подвижных форм тяжелых металлов в пахотном слое выявлена сильная достоверная их зависимость от содержания органического вещества в почве. В 2009 г. по отношению к предыдущему году снизился индекс суммарного загрязнения почвы (Zc); кадмий превышал ПДК подвижных форм ТМ в оба года исследования. Основными загрязнителями растительной продукции оказались никель и хром, причем более экологически устойчивой культурой к накоплению загрязнителей был ячмень. В качестве положительных моментов последствия ОСВ отметим увеличение продуктивности изучаемых культур (от 8 до 50 % к контролю), а также заметное превышение фонового содержания фосфора (почти в 5 раз в оба года исследований – вариант 5). На содержание обменного калия последствие ОСВ существенного влияния не оказывало.

Литература

1. *Агрохимия* / Под ред. Б.А. Ягодина. – М.: Мир, 2004. – 584 с.
2. *Агроэкология* / В.А. Черников, Р.М. Алексахин, А.В. Голубев и др.; Под ред. В.А. Черникова, А.И. Чежереса. – М.: Колос, 2000. – 536 с.
3. *Госкомгидромет СССР*, № 02-10 51-233 от 10.12.90.

4. *Основы опытного дела в растениеводстве* / В.Е. Ещенко, М.Ф. Трифонова, П.Г. Копытко и др.; Под ред. В.Е. Ещенко и М.Ф. Трифоновой. – М.: КолосС, 2009. – 268 с.

5. *Практикум по агрохимии: учебное пособие*. – 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. В.Г. Минеева. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 689 с.

6. *Санитарные правила и нормы СанПиН 2.1.7.573-96*. Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения (утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 31 октября 1996 г. N 46).

7. *Стратегия использования осадков сточных вод и компостов на их основе в агрокультуре*. Под редакцией академика Россельхозакадемии Н.З. Милащенко / ВИА им. Д.Н. Прянишникова. – М.: Агроконсалт, 2002. – 140 с.

8. *Чемерис М.С.* Экологические основы утилизации осадков городских сточных вод / РАСХН, Сиб. отд-ние. – Новосибирск, 2005. – 220 с.

9. *Черных Н.А., Милащенко Н.З., Ладонин В.Ф.* Экоотоксикологические аспекты загрязнения почв тяжелыми металлами. – М.: Агроконсалт, 1999. – 176 с.

10. *Яшин И.М., Карпачевский Л.О.* Экогеохимия ландшафтов (интерактивный курс): Учебно-практическое пособие / И.М. Яшин, Л.О. Карпачевский; Под ред. И.М. Яшина. – М.: Изд-во РГАУ – МСХА, 2010. – 224 с.

Aftereffect of sewage sludge and lime on the content of mobile heavy metals in the plow soil layer and their translocation to crop

V.A. Kasatkov¹, M.S. Chemeris², I.M. Yashin³, A.A. Peskarev³

¹*All-Russian Research Institute of Organic Fertilizers and Peat, Russian Academy of Agricultural Sciences, Vyatkinskoye, Sudogda raion, Vladimir oblast, 601390 Russia*

²*Novosibirsk State Agrarian University, Siberian Division, Russian Academy of Sciences, ul. Dobrolyubova 160, Novosibirsk, 630039 Russia*

³*Russian State Agricultural University – Moscow Agricultural Academy, Russian Academy of Sciences, ul. Timiryazeva 49, Moscow, 127550 Russia alexandrpeskarew@yandex.ru*

The agroecological state of an agrocenosis at the application of different rates of sewage sludge and lime was studied. The mobility of heavy metals in the soil and the content of ecotoxicants in crops were analyzed.

Keywords: sewage sludge, heavy metals, soil contamination, translocation, liming.