

## **ВЛИЯНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ОСАДКА ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД, ИЗВЕСТКОВАНИЯ НА АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВЫ, УРОЖАЙНОСТЬ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР И ИХ МАКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ В ДЛИТЕЛЬНОМ ОПЫТЕ**

**В.А. Касатиков, Н.П. Шабардина**

*ФГБНУ ВНИИОУ,  
г. Владимир, Россия*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Осадки сточных вод (ОСВ) и бытовые органические отходы являются одним из основных отходов производственной деятельности человека. Ежегодная масса производимых в РФ ОСВ при влажности 75 % составляет 12,8 млн т. Утилизация осадков сточных вод является решаемой проблемой. Использование осадка городских сточных вод (ОСВ) на удобрение в исходном состоянии или же в составе компоста – один из приемов его утилизации [1, 2].

Существует ряд других направлений использования осадков сточных вод, в том числе для производства органических удобрений на их основе, которое способствует решению вышеуказанной экологической проблемы.

ОСВ и удобрения на их основе, благодаря высокому содержанию органического вещества, улучшают плодородие почвы и его агрофизические свойства, повышают урожай сельскохозяйственных культур. Внесение ОСВ и компостов на их основе в почву проявляется во 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 данных органических удобрений проявляются на песчаных, супесчаных и малоплодородных деградированных почвах [3,4].

Цель исследований – изучить последствие систематического применения осадка городских сточных вод, известкования на урожайность и макроэлементный состав зерновых культур.

### **ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Исследования проводили на поле ФГБНУ ВНИИОУ в 2016–2017 гг. в стационарном опыте. Опыт заложен в 1984 г. и занесен в Реестр Географической сети опытов с удобрениями РФ. Аэробностабилизированные осадки сточных вод с очистных сооружений г. Владимира вносили ежегодно с 1984 по 1995 гг., а также периодически в 2000, 2006, 2010 и 2015 г. осенью в сочетании с периодическим известкованием доломитовой мукой в дозах 3, 6, 9 т/га в 1984, 1990, 1995, 2006 и 2015 гг. Суммарные дозы ОСВ составили 180–1440 т/га (50 % влажности). В результате длительного применения ОСВ в почву стационарного опыта поступило значительное количество ТМ. В табл. 1 приведено валовое содержание элементов в слое почвы 0–20 см на некоторых вариантах опыта.

Валовое содержание ТМ в почве (0–20 см), 2015 г.

Вариант	Cd	Cr	Cu	Zn	Pb	Ni	Z <sub>c</sub>
	мг/кг						
Контроль	1,59	61	48,2	108,3	11,8	3,5	–
ОСВ 180 т/га + дол. мука 3 т/га*	3,86	86,5	68,8	137,2	13,1	6,1	4,4
ОСВ 360 т/га + дол. мука 3 т/га	4,31	91,4	80,4	147,3	15,1	7,3	5,6
ОСВ 720 т/га + дол. мука 3 т/га	6,27	114,1	101,4	165,7	16,6	12	9,3
ОСВ 1440 т/га + дол. мука 3 т/га	9,44	123,4	127,1	181,6	18,7	24,8	16,0
ОСВ 360 т/га + дол. мука 9 т/га	4,78	60,0	55,2	120,9	15,7	9,2	5,2
ОСВ 720 т/га + дол. мука 9 т/га	6,51	87,1	86,3	154,0	16,8	12,8	8,8
ОСВ 1440 т/га + дол. мука 9 т/га	8,02	113,6	123,6	182,4	20,1	21,3	13,9
ОДК в почве, мг/кг	2,0	90	132	220	130	80	–

\*В этой и последующих таблицах дозы ОСВ приведены к 50 % влажности.

Почва опытного участка дерново-подзолистая, сформированная на двучленных ледниковых отложениях. Пахотный и иллювиальный горизонты находятся в толще супесчаного отложения, перекрывающего тяжелый моренный суглинок. Исходная агрохимическая характеристика слоя почвы 0–20 см в 1984 г. следующая: рН<sub>сол</sub> – 6,0, Н<sub>г</sub> – 1,05 мг-экв/100г почвы, S – 7,0 мг-экв/100г почвы, Р<sub>2</sub>О<sub>5</sub> – 95 мг/кг почвы, К<sub>2</sub>О – 43 мг/кг почвы, С<sub>орг</sub> – 0,8 %.

Исследования проводили в звене севооборота озимая рожь – яровое тритикале. Предшественник – люпин. В 2016 г. возделывали озимую рожь сорта Память Кондратенко, в 2017 г. – яровое тритикале сорта Россияка. Озимая рожь была посеяна 25 августа 2015 г., а яровое тритикале – 3 мая 2017 г. В период вегетации озимой ржи и ярового тритикале проводили фенологические наблюдения.

Осадок сточных вод ОСВ с очистных сооружений города Владимира представляет собой после 2–3-летнего мезофильного компостирования в буртах 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. 2).

Агрохимическая характеристика ОСВ

Показатель	2000 г.	2006 г.	2010 г.	2015 г.
Влажность, %	75,6	46,2	41,8	24,4
рН <sub>сол</sub>	7,2	6,8	6,8	7,9
N <sub>общ</sub> , %	1,42	1,26	0,98	0,84
Р <sub>2</sub> О <sub>5</sub> общ, %	3,72	2,22	2,18	2,48
К <sub>2</sub> О <sub>общ</sub> , %	0,51	0,51	0,41	0,32
Р <sub>2</sub> О <sub>5</sub> подв, мг/100 г	2049,0	711,0	296,0	187,0
К <sub>2</sub> О <sub>обм</sub> , мг/100 г	21,0	70,0	26,0	37,0
N-NO <sub>3</sub> , мг/кг	54,0	268,0	121,1	98,0

Микроэлементный состав осадка сильно варьирует по годам исследования. После внесения ОСВ в 2015 г. суммарные дозы составили от 180 до 1440 т/га, что привело к увеличению содержания ТМ в пахотном слое. Действующие нормативы по содержанию ТМ в почве были превышены: по кадмию (Cd) – в 1,2–4 раза для валового содержания, в 1,2–2,5 раза – для подвижных форм, по хromу (валовое содержание) – в 1,1–2,6 раза, по меди – в 1,1–1,4 раза.

Концентрация биодоступных соединений металлов в ОСВ также сильно колеблется. 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.

В данной статье представлены результаты исследований по влиянию длительного применения осадка городских сточных вод, доломитовой муки на миграцию макроэлементов в системе почва–культура (озимая рожь, яровое тритикале), на агрохимические свойства почвы и растений, урожайность опытных культур.

Для решения поставленных задач в 2016 и 2017 гг. отбирались смешанные образцы из пахотного горизонта дерново-подзолистой почвы. Озимую рожь и яровое тритикале убирали в фазе полной спелости зерна, учет урожая проводили поделяночно. Отбор почвенных образцов проводили тростевым буром в двух повторностях в слое 0–20 сантиметров. В почвенных и растительных образцах после уборки урожая агрохимические показатели определяли общепринятыми методами анализов. В почвенных образцах проводилось определение агроэкологических параметров согласно следующим методам исследований: pH солевой вытяжки; 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 (Практикум по агрохимии, 2001). Валовое содержание ТМ в почве и их подвижные формы определялись согласно ФР 1.31. 2002 00524.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ изменения агрохимических свойств пахотного слоя почвы по последнему действию ранее внесенных ОСВ и действию ОСВ внесенного осенью 2015 г. выявил снижение обменной кислотности почвы, особенно заметное в вариантах с максимальными дозами ОСВ и доломитовой муки (табл. 3). При этом сохраняется обратная зависимость  $H_r$  от уровня известкования почвы. По последнему действию ОСВ в текущем году сохранилась пропорциональная зависимость суммы поглощенных оснований от доз ОСВ и уровня известкования почвы. Их значения выросли с 7,28 до 8,42 мг-экв/100 г почвы. Данная зависимость обусловлена фактором разложения под влиянием почвенного биоценоза основной массы внесенного ОСВ и, как следствие, разрушением органоминеральных комплексов в составе ОСВ с высвобождением катионов  $Ca^{+2}$  и  $Mg^{+2}$ , а также фактором известкования. При этом емкость катионного обмена ППК находилась в пропорциональной зависимости от доз ОСВ и не зависела от уровня известкования почвы.

Как известно, по содержанию фосфора ОСВ существенно превосходят традиционные виды органических удобрений. По этой причине в условиях интенсивного применения ОСВ происходят выраженные изменения фосфатного режима поч-

вы. По действию ОСВ с высоким содержанием  $P_2O_5$  наблюдался рост значений  $P_{2O_{5\text{подв}}}$  в слое 0–20 см пропорционально дозам ОСВ в 1,7–4,1; 1,4–4,6 и 1,6–4,5 раза согласно уровням известкования.

Таблица 3

**Влияние длительного применения различных доз ОСВ  
в сочетании с известкованием на агрохимическую характеристику  
дерново-подзолистой супесчаной почвы, слой 0–20 см, 2016 г.**

Вариант опыта	pH <sub>KCl</sub>	H <sub>r</sub>	S (Ca+Mg)	ЕКО	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Гумус, %
		мг-экв/100 г			мг/кг		
Контроль (без удобрений)	6,50	0,54	7,28	7,82	490	33	1,51
ОСВ 180т/га + дол. мука 3 т/га	6,70	0,49	7,77	8,26	860	36	1,69
ОСВ 360 т/га + дол. мука 3 т/га	6,70	0,48	8,00	8,48	1100	38	1,82
ОСВ 720 т/га + дол. мука 3 т/га	6,70	0,46	8,18	8,64	1300	40	2,24
ОСВ 1440 т/га + дол. мука 3 т/га	6,67	0,45	8,30	8,75	2020	43	2,78
ОСВ 180 т/га + дол. мука 6 т/га	6,77	0,44	8,12	8,56	670	36	1,71
ОСВ 360 т/га + дол. мука 6 т/га	6,82	0,43	8,24	8,67	1170	38	1,83
ОСВ 720 т/га + дол. мука 6 т/га	6,82	0,43	8,25	8,68	1560	43	2,18
ОСВ1440 т/га + дол. мука 6 т/га	6,75	0,43	8,30	8,73	2280	46	2,97
ОСВ 180 т/га + дол. мука 9 т/га	6,83	0,43	8,25	8,68	780	30	1,76
ОСВ 360 т/га + дол. мука 9 т/га	6,86	0,42	8,33	8,75	990	38	1,89
ОСВ 720 т/га + дол. мука 9 т/га	6,84	0,42	8,37	8,79	1600	40	2,23
ОСВ 1440 т/га + дол. мука 9 т/га	6,83	0,41	8,42	8,83	2230	43	2,92

По сравнению с фосфором содержание  $K_2O_{\text{подв}}$  в почве изменялось менее интенсивно из-за более низкой концентрации элемента в ОСВ и колебалось в пределах 36–46 мг/кг.

Внесение в почву стабилизированного органического вещества в составе ОСВ способствовало сохранению высокого уровня гумусированности почвы, выявленного ранее [5]. Данная зависимость не связана с уровнем известкования почвы. Согласно результатам, приведенным в таблице 3, содержание гумуса в слое почвы 0–20 см находилось в прямой зависимости от величины суммарной дозы ОСВ, возрастая с 1,51 в контроле до 1,69–2,78 % (дол. мука 3 т/га), 1,71–2,97 (дол. мука 6 т/га) и 1,76–2,92 (дол. мука 9 т/га). Более высокое содержание гумуса в вариантах с уровнями известкования 6 и 9 т/га обусловлено пониженной миграционной активностью органического вещества.

Характер изменения агрохимических свойств пахотного слоя почвы по вариантам опыта в 2017 г. по последдействию ОСВ (в звене озимая рожь – яровое тритикале) сохранился. При этом, как и по действию ОСВ, внесенного в 2015 г., выявлена обратная зависимость  $H_r$  от уровня известкования почвы и доз ОСВ при пропорциональной зависимости величины суммы поглощенных оснований от доз ОСВ и уровня известкования почвы. Ее максимальные значения выросли до 8,39–8,77 мг-экв/100 г почвы.

Содержание  $P_{2O_{5\text{подв}}}$  за счет миграционных процессов и выноса урожая ярового тритикале снизилось в вариантах с ОСВ на 6–27 %, превышая уровень контроля в 1,2–3,3; 1,3–3,2 и 1,5–3,4 раза согласно степени известкования почвы. По сравнению с подвижным фосфором содержание  $K_2O_{\text{подв}}$  в почве изменялось

менее интенсивно из-за более низкой концентрации элемента в ОСВ и колебалось в пределах 32–38 мг/кг. При этом, как и по фосфору, проявилась тенденция к снижению его уровня по последдействию внесения ОСВ осенью 2015 г. за счет выноса яровым тритикале и миграции в нижележащие слои почвы.

Аналогичная зависимость выявлена по содержанию гумуса в слое почвы 0–20 см. В то же время сохраняется его пропорциональная зависимость от величины суммарной дозы ОСВ, возрастая с 1,50 в контроле до 1,63–2,58 % (дол. мука 3 т/га), 1,67–2,65 (дол. мука 6 т/га) и 1,72–2,73 (дол. мука 9 т/га).

Оптимизация гумусового состояния, агрохимических свойств пахотного слоя почвы способствовала повышению урожайности культур по действию и последствию ОСВ в условиях его систематического применения. В частности, прибавки урожайности зерна озимой ржи возрастали в прямой зависимости от суммарных доз ОСВ на 10–13; 20–23; 29–37 и 42–51 %. Достоверно значимые прибавки получены на всех фонах известкования, достигая максимума при уровнях известкования 3–6 т/га. Аналогичная зависимость выявлена по яровому тритикале. Прибавки урожайности зерна тритикале возрастали в прямой зависимости от суммарных доз ОСВ пропорционально уровням известкования на 17–22; 32–37; 46–61 и 87–94 % (табл. 4).

Таблица 4

**Влияние действия различных доз ОСВ в условиях его систематического применения на урожайность зерновых культур**

Вариант опыта	Озимая рожь			Яровое тритикале		
	урожай, ц/га	прибавка к контролю		урожай, ц/га	прибавка к контролю	
		ц/га	%		ц/га	%
Контроль (без удобрений)	26,7	–	–	12,0	–	–
ОСВ 180т/га + дол. мука 3 т/га	30,0	3,3	12	14,1	2,1	17
ОСВ 360 т/га + дол. мука 3 т/га	32,8	6,1	23	15,8	3,8	32
ОСВ 720 т/га + дол. мука 3 т/га	36,6	9,9	37	17,5	5,5	46
ОСВ1440 т/га + дол. мука 3 т/га	39,8	13,1	49	22,4	10,4	87
ОСВ 180 т/га + дол. мука 6 т/га	30,2	3,5	13	14,4	2,4	20
ОСВ 360 т/га + дол. мука 6 т/га	33,0	6,3	23	16,1	4,1	34
ОСВ 720 т/га + дол. мука 6 т/га	35,9	9,2	34	18,6	6,6	55
ОСВ1440 т/га + дол. мука 6 т/га	40,4	13,7	51	22,8	10,8	90
ОСВ 180 т/га + дол. мука 9 т/га	29,3	2,6	10	14,6	2,6	22
ОСВ 360 т/га + дол. мука 9 т/га	32,0	5,3	20	16,4	4,4	37
ОСВ 720 т/га + дол. мука 9 т/га	34,5	7,8	29	19,3	7,3	61
ОСВ1440 т/га + дол. мука 9 т/га	38,0	11,3	42	23,3	11,3	94
НСР <sub>05</sub>	1,67	–	–	1,59	–	–
Р, %	1,75	–	–	3,21	–	–

При этом величина продуктивности звена севооборота пропорциональна дозам ОСВ и не зависит от уровней известкования почвы. Следует отметить, что неблагоприятные погодные условия вегетационного периода 2017 г. сказались на урожайности ярового тритикале в опыте в сравнении с озимой рожью. И действительно, среднемесячные температуры в апреле–июле отклонялись от нормы на 2,6–3,0 °С. При этом количество осадков было в 1,2–1,8 раза выше среднемо-

голетнего уровня. ГТК вегетационного периода составил 2,40, что характеризует климатические условия вегетационного периода как избыточно влажные. С третьей декады июля произошла резкая смена погоды от прохладной и избыточно влажной к жаркой и засушливой. ГТК этого периода составил всего 0,45, что характеризует условия данного периода как засушливые.

Кроме существенного влияния на агрохимические свойства почвы и, как следствие, урожайность озимой ржи и ярового тритикале, ОСВ способствует изменению макроэлементного состава зерновой части урожая рассматриваемых культур. В частности, по действию ОСВ содержание азота в зерне озимой ржи повысилось с 1,58 % на контроле до 1,61–1,91 % с максимальным уровнем азота в вариантах с дозой известкования 6 т/га. Данная зависимость сохраняется и в соломе и объясняется проявлением эффекта ростового разбавления. В то же время действие ОСВ на фоне длительного его последствия и в сочетании с известкованием не способствует ожидаемому повышению содержания фосфора. Следует отметить, что по всем рассмотренным макроэлементам максимальный уровень их содержания в биомассе озимой ржи выявлен при систематическом внесении ОСВ по фону известкования с дозой 3 т/га доломитовой муки. Данная зависимость обусловлена снижением доступности макроэлементов при более высоких дозах известкования.

При этом максимальный уровень азота в зерне ярового тритикале получен при дозе известкования 9 т/га. В то же время систематическое применение ОСВ на фоне известкования не способствует ожидаемому повышению содержания фосфора в растительной продукции. В отличие от данных, полученных в 2016 г., в 2017 г. не выявлено влияние эффекта «ростового разбавления» на содержание азота и фосфора в зерне ярового тритикале, обусловленное ростом урожайности. Данная зависимость не распространяется также и на концентрацию калия в зерне и соломе ярового тритикале.

## ВЫВОДЫ

1. Использование нетрадиционных источников питания растений в виде ОСВ оказывает положительное пролонгированное влияние на агрохимические свойства почвы, урожайность зерновых культур и их макроэлементный состав.

2. Выявлена обратная зависимость  $N_p$  от уровня известкования почвы и доз ОСВ при пропорциональной зависимости величины суммы поглощенных оснований за счет деструкции под влиянием почвенного биомассы ОСВ с разрушением органоминеральных комплексов в их составе ОСВ.

3. В условиях интенсивного применения ОСВ происходят выраженные изменения фосфатного режима почвы. По действию ОСВ с высоким содержанием  $P_2O_{5\text{общ}}$  наблюдался рост значений  $P_2O_{5\text{подв}}$  в слое 0–20 см пропорционально дозам ОСВ в 1,7–4,1; 1,4–4,6 и 1,6–4,5 раза согласно уровням известкования.

4. Оптимизация гумусового состояния, агрохимических свойств пахотного слоя почвы способствовала повышению урожайности культур по действию и последствию ОСВ в условиях его систематического применения. В частности, прибавки урожайности зерна озимой ржи возрастали в прямой зависимости от суммарных доз ОСВ на 10–13; 20–23; 29–37 и 42–51 %, а ярового тритикале – на 17–22; 32–37; 46–61 % и 87–94 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анциферова, Е.Ю. Эколого-агрохимическая оценка осадков сточных вод, используемых в качестве удобрения: автореф. дис. ... канд. биол. наук / Е.Ю. Анциферова; МГУ. – М., 2003. – 23 с.
2. Анализ опыта почвенного пути утилизации осадков сточных вод / Н.К. Сюняев [и др.]. – М.: ФГОУ ВПО РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, 2008. – 108 с.
3. Касатиков, В.А. Агроэкологические 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.
4. Касатиков, В.А. Влияние микробиологических деструкторов лигнинсодержащих отходов на агроэкологические свойства компоста на основе осадка сточных вод и опилок / В.А. Касатиков, В.А. Раскатов, Н.П. Шабардина // Доклады МСХА. – 2010. – Вып. 283. – С. 806–811.
5. Касатиков, В.А. Влияние осадков сточных вод и гумусовых соединений на фоне известкования на агроэкологические свойства почвы и содержание тяжелых металлов в растениях / В.А. Касатиков, Н.П. Шабардина, В.А. Раскатов // Агрохимический вестник. – 2015. – № 4. – С. 39–42.

## THE INFLUENCE OF THE SYSTEMATIC APPLICATION OF SLUDGE OF MUNICIPAL WASTEWATER LIMING ON AGRO-ECOLOGICAL PROPERTIES OF THE SOIL, THE YIELD OF GRAIN CROPS AND THEIR MACRONUTRIENT COMPOSITION ON LONG EXPERIENCE

V.A. Kasatikov, N.P. Shabardina

### Summary

The article presents the results obtained in long-term experience on the study of the action and aftereffect of the systematic application of urban sewage sludge, liming on the agroecological properties of sod-podzolic sandy soil, yield and macroelement composition of grain crops. It is concluded that the use of alternative sources of plant nutrition in the form of WWS has a positive prolonged effect on the agrochemical properties of the soil, the yield of grain crops and their macroelement composition.

*Поступила 03.05.18*