



Анатолий Лицкевич,
завлабораторией
Полесского аграрно-
экологического
института
НАН Беларуси



Мария Гулькович,
научный сотрудник
Полесского аграрно-
экологического
института
НАН Беларуси



Ольга Чезлова,
научный сотрудник
Полесского аграрно-
экологического
института
НАН Беларуси

В Беларуси продолжается процесс интенсивного накопления отходов. Согласно Национальной стратегии по обращению с ТКО и вторичными материальными ресурсами, к 2035 г. уровень переработки их органической части путем биотермической обработки и метанового сбраживания должен составить 23%. Сегодня доля компостирования отходов не превышает 1,5%, при этом применяемые методы являются длительными, а компост получается невысокого качества с ограниченной зоной применения (для озеленения, восстановления земель на месте свалок, ухода за лесонасаждениями). Для культурного земледелия он не подходит вследствие загрязнения тяжелыми металлами (ТМ), неор-

ганическими примесями [1] и патогенными бактериями.

Использование в сельском хозяйстве осадков сточных вод (ОСВ) в качестве органического удобрения зачастую приводит к загрязнению почв ТМ. При этом изменяется не только общее содержание тяжелых металлов, но и подвижность, фракционный состав соединений. Они опасны высокой токсичностью и вовлеченностью в биологический круговорот без предварительной трансформации [2].

Целью нашего исследования стала оценка возможности производства органических удобрений на основе ОСВ. Выполнен анализ содержания тяжелых металлов в их составе, в почве при их внесении и в малоопасных производственных отходах. Изучены процессы отмирания санитарно-показательных

ОСАДКИ СТОЧНЫХ ВОД И КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ НА ИХ ОСНОВЕ

УДК 628.381.1

бактерий осадка при полевом хранении в холодный и теплый периоды года и проведен мелкоделяночный полевой эксперимент для выявления возможного загрязнения почвы при внесении изучаемого материала.

Объект исследования – обезвоженный ОСВ Брестского мусороперерабатывающего завода, образующийся в результате анаэробного сбраживания смеси сырого осадка и уплотненного избыточного активного ила. Субстрат представляет собой водонасыщенную пластичную органическую массу серо-черного цвета, влажностью 85%, достаточно технологичную в погрузке, транспортировке и внесении в почву.

Экспериментальная площадка для испытаний находилась в пределах сельхозугодий ОАО «Рита» (Малоритский р-он Брестской обл.). Для

оценки влияния удобрения на почвы в мелкоделяночном полевом эксперименте проведены 4 опыта, каждый из которых продублирован четырьмя в следующих вариантах:

- *контроль, почва сельхозугодий без внесения удобрения;*
- *с удобрением на основе обезвоженного ОСВ, 10 т/га;*
- *с использованием данного удобрения в объеме 30 т/га;*
- *с добавлением 100 т/га ОСВ.*

Валовое содержание ТМ в обезвоженном сброженном ОСВ и почвах определялось атомно-абсорбционным методом, бактериологические показатели получены по стандартным методикам, принятым на территории республики.

Содержание ТМ в составе малоопасных производственных отходов, образующихся в результате деятельности Брестского мусороперерабатыва-

ющего завода, и в составе органического удобрения на основе обезвоженного сброженного осадка сточных вод представлено в *табл. 1*. Влажность ОСВ составила 88%, что соответствует требованиям разработанных ТУ ВУ291000450.003–2021. Превышений содержания ТМ во всех исследуемых субстратах фактической влажности не отмечено.

По данным литературных источников количество микроэлементов в ОСВ колеблется в достаточно широких пределах: медь 50–4000, цинк 70–40 000, марганец 60–4000, кобальт 2–300 мг на 1 кг сухого вещества [3–7].

Установлено, что с урожаями сельскохозяйственных культур на уровне 30–35 ц зерновых, 200–300 ц картофеля и 50–60 ц сена с 1 га ежегодно выносятся по 100–600 г цинка

	Pb	Cd	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni	Co	Cr
ПДК	32	0,5	66	110	1000	–	20	20	100
Фактическая влажность									
Удобрение (партия 1)	2,214	0,084	5,5596	51,631	6,69	336,85	2,4936	0,1716	4,4808
Удобрение (партия 2)	2,4696	0,1128	13,635	102,36	12,813	772,31	2,166	0,1836	8,1
ОСВ	3,648	0,03	17,877	97,182	16,491	794,07	5,9208	0,6396	11,319
Сухое вещество									
Удобрение (партия 1)	18,45	0,7	46,33	430,26	55,75	2807,1	20,78	1,43	37,34
Удобрение (партия 2)	20,58	0,94	113,63	853,02	106,78	6435,9	18,05	1,53	67,5
ОСВ	30,4	0,25	148,98	809,85	137,43	6617,3	49,34	5,33	94,33

Таблица 1. Содержание ТМ в составе отходов производства и удобрениях, мг/кг

и марганца, 30–200 г меди, 1–6 г кобальта, 3–15 г молибдена. Расчеты показывают, что внесение 1–4 т сухого вещества ОСВ с содержанием указанных элементов на уровне ПДК может на 8–10 лет обеспечить бездефицитный баланс микроэлементов в севообороте. Это очень важно, поскольку почвы с низким содержанием микроэлементов составляют в различных районах страны от 10 до 40% пашни, а промышленное производство микроудобрений весьма ограничено.

При внесении органического удобрения на основе обезвоженного сброженного ОСВ нельзя допускать загрязнения почв ТМ. Для выявления чего проведен мелкоделяночный полевой эксперимент (табл. 2.).

Опыт показал, что внесение удобрения дозами 10–100 т/га не приводит к превышению ПДК в почвах по свинцу, марганцу, никелю, хрому, кадмию, кобальту. В трех случаях из шести наблюдалось незначительное превышение по меди (0,05–0,35). По цинку только в одном варианте опыта при максимальной дозировке 100 т/га содержание данного ТМ находилось на уровне ПДК. Учитывая, что и медь, и цинк необходимы для роста и развития растений, их содержание в урожае не будет превышать норму за счет эффекта «ростового разбавления». Кадмий и кобальт не были обнаружены в образцах почвы после внесения удобрения.

Выявлено, что применение исследуемого материала дозами 10–30 т/га не ухудшает качество почв по ТМ, а в дозе 100 т/га приводит к увеличению содержания меди и цинка до уровня ПДК.

Изучение санитарно-бактериологического состояния ОСВ Брестского мусороперерабатывающего завода для оптимизации процессов обеззараживания при производстве удобрения проводили в двух направлениях:

Оценка степени самоочищения ОСВ в бурте при закладке его в теплый (апрель – октябрь) и в холодный (ноябрь – март) период года. Выделение данных временных отрезков обусловлено началом и концом вегетационного периода, когда сред-

Вариант опыта		Валовое содержание ТМ, мг/кг					
		Pb	Cu	Zn	Mn	Ni	Cr
Контроль		6,9	55,79	29,4	26,71	0	3,55
Партия удобрения 1	10 т/га	7,5	68,69	32,52	25,98	0	3,48
	30 т/га	8,37	73,14	46,87	24,55	0	3,71
	100 т/га	7,22	46,15	58,11	30,18	1,26	5,25
Партия удобрения 2	10 т/га	6,38	39,52	27,56	27,87	0	3,86
	30 т/га	7,95	89,98	42,83	23,37	0	3,97
	100 т/га	7,87	55,81	109,81	29,49	0,73	5,45
ПДК		32	66	110	1000	20	100

Таблица 2. Содержание ТМ в почвах при внесении удобрения органического на основе обезвоженного сброженного ОСВ

немесячные температуры проходят через отметку +5 °С.

Оценка влияния микробиологической составляющей ОСВ на почвы сельхозугодий в мелкоделяночном полевом эксперименте.

Свежий осадок сточных вод Брестского мусороперерабатывающего завода содержал значительное количество санитарно-показательных микроорганизмов: бактерии группы кишечной палочки (БГКП) обнаруживались в количестве от $2,4 \times 10^3$ до $2,1 \times 10^4$ КОЕ (колониеобразующие единицы)/г, содержание энтерококков – $(1,2-5) \times 10^4$ КОЕ/г осадка фактической влажности. Патогенные бактерии (в том числе сальмонеллы) в ОСВ обнаружены не были.

Микробиологический анализ выявил снижение количества санитарно-показательной микрофлоры осадков в зависимости от времени их выдерживания в буртах при полевом хранении (табл. 3).

Через два месяца хранения в бурте содержание санитарно-показательных бактерий в ОСВ снизилось до количества менее 10 КОЕ/г. Патогенные бактерии (в том числе сальмонеллы) обнаружены не были.

Исследования микробиологических характеристик ОСВ в холодный период проводилось в течение 3 месяцев от момента закладки бурта (табл. 4) с периодичностью две недели.

Через два месяца после складирования количество БГКП снизилось почти на два порядка, но количество энтерококков было существенным – $(9,33 \pm 0,58) \times 10^3$ КОЕ/г и затем уменьшалось незначительно. Патогенные бактерии (в том числе сальмонеллы) в образцах обнаружены не были.

Образец	БГКП, КОЕ/г	Энтерококки, КОЕ/г	Патогенные бактерии, КОЕ/г
ОСВ 1 месяц хранения	$(3,33 \pm 0,58) \times 10^2$	$(6,67 \pm 1,15) \times 10^2$	не обнаружены
ОСВ 2 месяца хранения	<10	<10	не обнаружены
ОСВ 3 месяца хранения	<10	<10	не обнаружены

Таблица 3. Санитарно-бактериологические показатели ОСВ фактической влажности при полевом хранении в теплый период ($M \pm m$), $n=2$.

Примечание: M – среднее арифметическое, m – стандартное отклонение

Образец	БГКП, КОЕ/г	Энтерококки, КОЕ/г	Патогенные бактерии, КОЕ/г
ОСВ 1 месяц хранения	$(1,83 \pm 0,15) \times 10^4$	$(2,17 \pm 0,21) \times 10^4$	не обнаружены
ОСВ 1,5 месяца хранения	$(2,03 \pm 0,15) \times 10^3$	$(1,10 \pm 0,10) \times 10^4$	не обнаружены
ОСВ 2 месяца хранения	$(9,67 \pm 1,53) \times 10^2$	$(9,33 \pm 0,58) \times 10^3$	не обнаружены
ОСВ 2,5 месяца хранения	$(7,67 \pm 1,53) \times 10^2$	$(6,03 \pm 0,15) \times 10^3$	не обнаружены
ОСВ 3 месяца хранения	$(2,33 \pm 0,58) \times 10^2$	$(4,13 \pm 0,12) \times 10^3$	не обнаружены

Таблица 4. Санитарно-бактериологические показатели ОСВ фактической влажности при полевом хранении в холодный период ($M \pm m$), $n=2$.

Примечание: M – среднее арифметическое, m – стандартное отклонение

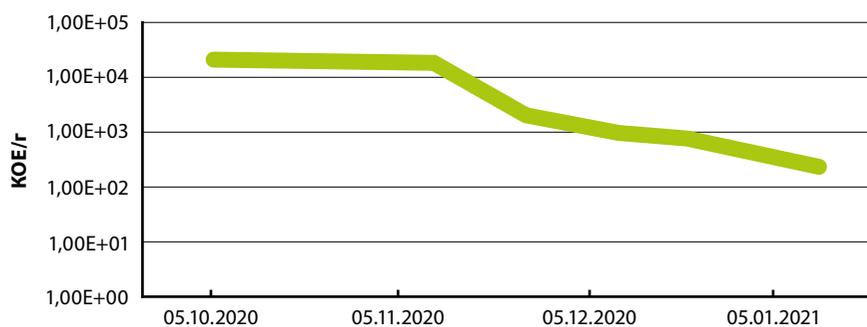


Рис. 1. Динамика отмирания БГКП в ОСВ при полевом складировании в холодный период

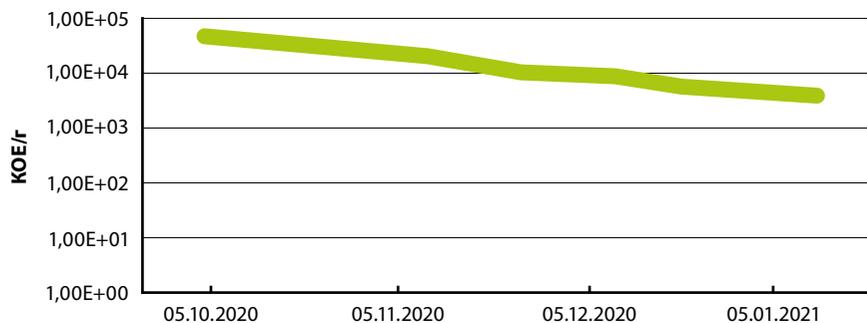


Рис. 2. Динамика отмирания энтерококков в ОСВ при полевом складировании в холодный период

Наименование показателя	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, R ²	Значимость F-критерия	D-значения, дни	Коэффициент отмирания k, день ⁻¹
БГКП	$N_{\text{БГКП}} = e^{10,51-0,05^*t}$	0,88	0,006	46,30	0,048
Энтерококки	$N_{\text{ЭНТ}} = e^{10,80-0,03^*t}$	0,98	9,61E-05	78,74	0,03

Таблица 5. Уравнения линейной регрессии отмирания БГКП и энтерококков в ОСВ

На рис. 1 и 2 отражен ход отмирания колиформ и энтерококков в ОСВ в холодный период. Для описания динамики отмирания санитарно-показательной микрофлоры проведен регрессионный анализ. Выведены уравнения регрессии, имеющие значимые параметры, проведены расчеты на их основе (табл. 5). С помощью полученных зависимостей рассчитаны 10-кратные сокращения численности бактерий. Так, для БГКП было необходимо 46,3 дня для 90%-ного уменьшения количества микроорганизмов. Для энтерококков этот

показатель определялся на уровне 78,74 дня. Однако даже через 3 месяца от начала хранения ОСВ в полевых условиях численность исследуемых санитарно-показательных бактерий в осадке была значительной. Так, количество БГКП и энтерококков составило $(2,33 \pm 0,58) \times 10^2$ и $(4,13 \pm 0,12) \times 10^3$ КОЕ/г соответственно.

Таким образом, выявлено, что процесс обеззараживания ОСВ при хранении в поле происходит интенсивнее в теплый период года (апрель – октябрь), что позволяет использовать его как орга-

ническое удобрение через два месяца от момента закладки бурта. С ноября по март процессы отмирания санитарно-показательной микрофлоры происходят медленнее, и, несмотря на отсутствие в осадке патогенных бактерий (в том числе сальмонелл), его использование в качестве почвоулучшающей добавки возможно не ранее чем через 3 месяца после закладки бурта под зерновые, зернобобовые, зернофуражные и технические культуры.

При применении органического удобрения на основе ОСВ нельзя допускать загрязнения почвы фекальными бактериями. По санитарно-бактериологическим показателям земля опытного участка относится к категории «чистой», так как БГКП и энтерококки находились в ней в количестве менее 10 КОЕ/г, а патогенные бактерии (в том числе сальмонеллы) не обнаружены. Для выявления возможного загрязнения почвы при внесении исследуемого осадка проведен мелкоделяночный полевой эксперимент.

Через 1,5 месяца после внесения органического отхода были отобраны пробы почвы для микробиологического анализа (табл. 6). В отличие от процессов отмирания санитарно-показательных бактерий в бурте ОСВ, в почве, удобренной осадком, энтерококки исчезали быстрее, чем БГКП. Так, при внесении ОСВ двухмесяч-

Вариант опыта	БГКП, КОЕ/г асп.	Энтерококки, КОЕ/г асп.	Патогенные бактерии, КОЕ/г асп.
Контроль без ОСВ	7,23±2,57	6,36±2,41	не обнаружены
10 т/га ОСВ, 1 мес. хранения	21,17±2,32	13,05±1,77	не обнаружены
10 т/га ОСВ, 2 мес. хранения	9,80±1,56	8,36±2,40	не обнаружены
10 т/га ОСВ, 3 мес. хранения	7,78±2,40	4,61±0,67	не обнаружены
30 т/га ОСВ, 1 мес. хранения	$(1,86 \pm 0,20) \times 10^2$	$(3,93 \pm 0,79) \times 10^2$	не обнаружены
30 т/га ОСВ, 2 мес. хранения	18,91±5,15	17,43±6,25	не обнаружены
30 т/га ОСВ, 3 мес. хранения	12,05±3,59	9,41±3,78	не обнаружены
100 т/га ОСВ, 1 мес. хранения	$(3,89 \pm 0,54) \times 10^3$	$(2,54 \pm 0,51) \times 10^3$	не обнаружены
100 т/га ОСВ, 2 мес. хранения	$(2,15 \pm 0,54) \times 10^2$	14,93±3,84	не обнаружены
100 т/га ОСВ, 3 мес. хранения	15,63±1,87	10,72±3,94	не обнаружены

Таблица 6. Микробиологические характеристики почв после внесения ОСВ ($M \pm m$), $n=4$

Примечание: M – среднее арифметическое, m – стандартное отклонение, асп. – абсолютно сухая почва

ного хранения в максимальном объеме 100 т/га БГКП в почве обнаруживались в количестве $(2,15 \pm 0,54) \times 10^2$ КОЕ/г, а энтерококки – $14,93 \pm 3,84$ КОЕ/г.

Полученные данные обработаны с помощью двухфакторного дисперсионного анализа, позволяющего не только проверить возможную зависимость результативного признака (количество бактерий в почве) от двух независимых переменных – факторов объема внесения и срока хранения осадка в поле, но и возможное их взаимодействие.

Анализ результатов свидетельствует о существенном влиянии на количество БГКП и энтерококков в почве сроков хранения и объема ОСВ. Для уточнения времени выдерживания последних в бурте, для наиболее значимого показателя БГКП проведен регрессионный анализ отдельно по каждому из выбранных объемов внесения – 10, 30, 100 т/га (табл. 7).

Моделирование процессов обеззараживания ОСВ позволило сделать следующие предположения. При внесении 10 т/га гигиеническая норма для санитарно-защитных зон (99 КОЕ/г согласно Инструкции 2.1.7.11–12–5–2004 [8]) не была превышена ни по одному варианту. При 30 и 100 т/га для соответствия удобренной почвой нормы 1–99 КОЕ/г по показателю БГКП ОСВ должен быть выдержан (в теплый период года) при норме внесения 30 т/га – 37 дней, при 100 т/га – 69 дней.

Для того чтобы после внесения удобрения на основе ОСВ почва соответствовала санитарному состоянию исходных земель (менее 10 КОЕ/г), осадок должен быть выдер-

Объем внесения ОСВ	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, R ²	Значимость F-критерия
10 т/га	$N_{\text{БГКП}} = e^{3,477-0,017 \cdot t}$	0,77	0,0001
30 т/га	$N_{\text{БГКП}} = e^{6,284-0,046 \cdot t}$	0,88	0,006
100 т/га	$N_{\text{Энт}} = e^{10,973-0,092 \cdot t}$	0,98	9,61E-05

Таблица 7. Результаты регрессионного анализа для показателя БГКП в почве

жан в теплый период года при норме внесения 10 т/га – 75 дней, при 30 т/га – 89 дней, при 100 т/га – 95 дней.

Оценка содержания тяжелых металлов в отходах производства КПУП «Брестский мусороперерабатывающий завод» и получаемом органическом удобрении, а также в землях после его применения позволяет сделать вывод, что показатели по тяжелым металлам в их составе не превышают уровень ПДК для почв.

На основе проведенного двухфакторного дисперсионного анализа и регрессионного моделирования процессов обеззараживания установлено, что содержание санитарно-показательных бак-

терий в почве после применения данных удобрений находится в прямой зависимости как от сроков полевого хранения осадка, так и от объемов его внесения. При использовании 10 т/га норма для санитарно-защитных зон (не выше 99 КОЕ/г) не нарушается. При внесении 30 и 100 т/га для того, чтобы количество БГКП в удобренной почве не превышало гигиенический норматив, осадок следует выдержать в полевых условиях 37 и 69 дней соответственно, а чтобы не увеличивались значения показателей исходной почвы – 89 и 95 дней. В связи с этим следует признать перспективность развития данного направления. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. С.В. Плышевский. Переработка органической части ТКО компостированием / С.В. Плышевский, А.Л. Ковш // Экология на предприятии. 2021. №4 (118). С. 89–96.
2. И.О. Плеханова. Влияние осадков сточных вод на содержание и фракционный состав тяжелых металлов в супесчаных дерново-подзолистых почвах / И.О. Плеханова, О.В. Кленова, Ю.Д. Кутукова // Почвоведение. 2001. №4. С. 496–503.
3. Пинский Д.Л. Формы соединений цинка и кадмия в естественных и загрязненных почвах / Д.Л. Пинский // Цинк и кадмий в окружающей среде. – М., 1992.
4. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение. – Новосибирск, 1991.
5. В.А. Касатиков. Влияние осадков городских сточных вод на микроэлементный состав почв / В.А. Касатиков // Почвоведение. 1991. №9. С. 41–49.
6. И.О. Плеханова. Накопление тяжелых металлов сельскохозяйственными растениями при внесении осадков сточных вод / И.О. Плеханова, Ю.Д. Кутукова, А.И. Обухов // Почвоведение. 1995. №12. С. 1530–1535.
7. Середина В.П. Загрязнение почв: учебное пособие. – Томск, 2015.
8. Гигиеническая оценка почвы населенных мест: Инструкция 2.1.7.11–12–5–2004, утв. Постановлением Гл. гос. санитарного врача №32 от 03.03.04 // Сборник нормативных документов по гигиенической оценке почвы населенных мест. – Минск, 2004.