

ИЗМЕНЧИВОСТЬ КСЕНОБИОТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И МИКРОБИОЦЕНОЗА В КОМПСТИРУЕМОМ КОМПОЗИТЕ «ТВЕРДЫЕ БЫТОВЫЕ ОТХОДЫ»

Гарабаджиу А.В.¹, Джамалова Г.А.², Джолдыбаева С.М.², Свирко Е.А.¹

¹Санкт-Петербургский государственный технологический институт, Санкт-Петербург, e-mail: svirko_evgeniya@mail.ru;

²Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы

Приводятся результаты экспериментального исследования по изучению физико-химической и микробиологической трансформации компостируемого модельного образца «твердые бытовые отходы» во времени. Определено, что в процессе компостирования при переходе от одной к другой фазе в композите наблюдается постепенное повышение исследуемых химических показателей. При этом как перед началом эксперимента, так и после фазы созревания компостируемый композит «твердые бытовые отходы» по исследуемым показателям не превышал ПДК, за исключением таких элементов, как ртуть, кадмий, молибден, свинец и формальдегид. Также меняется в процессе компостирования по фазам и микробиоценоз композита «твердые бытовые отходы»: при переходе из одной в другую фазу при учете уровня разведения происходит уменьшение численности по сравнению с первоначальными данными для ОМЧ примерно на 29%, колиморфных бактерий – на 75%, актиномицетов – на 67% и микромицетов – на 33%.

Ключевые слова: фазы компостирования, модельный образец «твердые бытовые отходы», компост, ксенобиотики, колониеобразующие единицы.

VARIABILITY OF XENOBIOTIC ACTIVITY AND MICROBIOCENOSIS IN "MUNICIPAL SOLID WASTE" COMPOSTABLE COMPOSITE

¹Garabadzhiu A.V., ²Jamalova G.A., ²Dzholdybayeva S.M., ¹Svirko E.A.

¹St. Petersburg State Technological Institute, Saint-Petersburg, e-mail: svirko_evgeniya@mail.ru;

²Kazakh National Technical University after K.I. Satpayev, Almaty

The results of a pilot research aimed at studying physical, chemical and microbiological transformation in time of the "municipal solid waste" compostable composite are given herein. It is defined that a systematic increase of the studied chemical indicators is observed during the composting process when the composite is transiting from one phase to another. Thus, both before experiment, and after a maturing phase the "municipal solid waste" compostable composite did not exceed the maximum concentration limit as to the studied indicators, except for such elements as mercury, cadmium, molybdenum, lead and formaldehyde. The microbiocenosis of "municipal solid waste" composite also changes by phases during the composting process: during transition from one phase to another, taking into account the dilution level, there occurs a reduction of the number in comparison with the initial data for total microbial count approximately for 29%, Coliform bacteria – for 75%, actinomyces – for 67%, and micromycetes – for 33%.

Keywords: Composting phases, "municipal solid waste" composite, compost, xenobiotics, colony-forming units.

Произведённый из твердых бытовых отходов компост имеет высокое содержание ксенобиотиков. Такой компост может использоваться только локально для поддержания санитарных норм техногенного грунта полигона ТБО.

Цель: изучение изменчивости в содержании ксенобиотиков и активности микробиоценоза по фазам развития компостируемого модельного субстрата «твердые бытовые отходы».

Объект и методика исследований. Объектом исследования послужили модельные образцы ТБО («моТБО»), образующиеся на территории юга и юго-востока Казахстана и представленные примерно на 71% органическими компонентами [13].

Компостирование проводили согласно ГОСТ [3-7]. Составляющие модельного образца ТБО в целях интенсификации процессов аэробного разложения были измельчены до размеров 2-5 мм [1].

Плановые мероприятия заключались в поддержании по фазам развития оптимальной температуры и влажности. Для поддержания аэробного процесса разложения проводили аэрирование путем ворошения компостируемого субстрата. После ворошения через 48-72 часа для восстановления влажности в субстрат добавляли стерильную дистиллированную воду [22].

Результаты исследований. Динамика физических и органолептических свойств компостируемого модельного субстрата «ТБО» представлена в таблице 1.

Таблица 1

Динамика физических и органолептических свойств компостируемого модельного субстрата «ТБО»

№	Показатель	Фаза компостирования			
		лаг	мезофильная	термофильная	созревания
Физические свойства					
1	t, С°	17-20	25-29	60	29-30
2	W, %	29-35	50-55	49-52	50-55
3	Физическое состояние	Измельчены до грубодисперсной гетерогенной смеси (размеры менее 15 мм)	Грубодисперсная гетерогенная смесь	Грубодисперсная гетерогенная смесь	Влажная рыхлая мелкокомкообразно однородная масса
Органолептические свойства					
4	Цвет	Коричнево-желто-серый	Коричнево-желто-серый	Темно-коричневый	Темно-коричневый
5	Запах	Резкий тухлый. Доминирует запах рыбных отходов	Заметный неприятный запах отходов	Слабый неприятный запах	Землянистый специфический

Физические свойства модельного образца ТБО имели следующие характеристики: в начале компостирования температура находилась на уровне 17 °С, влажность – 29%, тогда как в конце 30 °С и 52% соответственно. В целом физическое состояние отходов было неоднородным, а по цвету компостируемый субстрат характеризовался вначале коричнево-желто-серым цветом, а в конце темно-коричневым. Отходы в начале процесса компостирования имели специфический запах, характерный для ТБО, тогда как после фазы созревания для субстрата был характерен землянистый запах. Особый интерес представляет вопрос по изучению химических показателей компостируемого модельного субстрата «ТБО» по фазам развития (таблица 2).

Таблица 2

Динамика химического состава компостируемого модельного субстрата «ТБО» по фазам развития

№ п/п	Наименование	Начало эксперимента		Фазы компостирования								ПДК, мг/кг	Источник	Допуст. содер. в компосте мг/кг [2,25]
				лаг		мезофильная		термофильная		созревания				
		$\bar{X} \pm m_{\bar{X}}$, мг/кг	$C_v, \%$	$\bar{X} \pm m_{\bar{X}}$, мг/кг	$C_v, \%$	$\bar{X} \pm m_{\bar{X}}$, мг/кг	$C_v, \%$	$\bar{X} \pm m_{\bar{X}}$, мг/кг	$C_v, \%$	$\bar{X} \pm m_{\bar{X}}$, мг/кг	$C_v, \%$			
1	Хром	0,11±0,03	36	0,22±0,05	32	0,19±0,07	50	0,31±0,02	10	0,36±0,05	19	0,5	8,9,12	<50
2	Ртуть	1,23±0,23	26	4,33±0,41	13	4,87±1,48	43	6,67±0,44	9	8,67±0,72	12	2,1	8,9,14	<0,3
3	Бор	2,80±0,90	50	4,50±0,70	21	6,43±2,14	47	6,17±0,60	13	7,20±1,00	20	50	20	-
4	Кадмий	16,40±4,61	40	33,50±4,90	20	51,13±16,35	45	49,33±4,30	12	61,87±7,02	16	2	10	<0,7
5	Цинк	0,21±0,05	36	0,35±0,08	34	0,30±0,10	48	0,49±0,03	9	0,59±0,07	16	23	12	<200
6	Кобальт	0,22±0,06	41	0,33±0,05	20	0,52±0,17	47	0,49±0,14	39	0,57±0,14	33	5	12	<25
7	Молибден	7,80±1,80	32	25±3,32	19	35,3±8,17	32	37,10±3,70	14	52,27±5,03	14	5	26	-
8	Свинец	38,0±9,2	34	79±11,90	21	110,7±27,50	35	116,50±8,50	10	146,70±16,70	16	32	12	<100
9	Селен	0,35±0,08	31	0,95±0,11	16	1,317±0,46	49	1,81±0,11	8	2,32±0,23	14	10	14	-
10	Алюминий	0,19±0,07	56	0,37±0,06	22	0,51±0,16	44	0,49±0,10	15	0,62±0,07	16	150	17,23	<20
11	Барий	20,33±6,55	45	50±5,805	16	71±19,30	38	69,33±6,50	13	102±10	14	200	11	-
12	Марганец	1,29±0,73	79	4,06±0,22	7	5,54±1,67	42	7,39±0,43	8	8,99±0,91	14	1500	12	-
13	Медь	0,26±0,07	38	0,64±0,09	20	0,89±0,22	24	0,97±0,12	17	1,21±0,14	16	3	12	<60
14	Никель	0,26±0,06	35	0,66±0,09	19	0,92±0,24	36	1,02±0,12	17	1,31±0,13	14	4	12	<20
15	Нитрат	8,80±3,07	49	19,57±3,64	26	25,07±7,37	41	31,97±3,60	16	36,27±5,31	21	130	12	-
16	Фосфат	0,02±0,01	39	0,04±0,02	64	0,03±0,01	49	0,04±0,01	5	0,09±0,05	74	27,2	12	-
17	Хлорид	2,43±0,84	49	14,47±5,89	57	6,30±2,50	55	15±4,07	38	14,4±2,34	23	560	15	-
18	Железо общее	0,22±0,08	51	0,57±0,08	20	0,76±0,20	31	0,85±0,09	14	0,96±0,12	18	3800	22	-
19	Сульфат	10±2,50	35	27,70±4,03	20	39,30±9,60	34	41±3,70	13	57,33±5,95	15	160	18	-
20	Формальдегид	46±12,30	38	60±2,84	7	65±22,90	49	101,70±6,20	8	122,7±14,1	16	7	12	-

Как видно из таблицы 1, в процессе компостирования при переходе от одной фазы к другой вследствие микробиологических трансформаций в субстрате происходят различные физико-химические преобразования (например, окисление химических компонентов ТБО), направленные на постепенное повышение химических веществ. При этом следует отметить: как перед началом эксперимента, так и после фазы созревания компостируемый модельный субстрат «ТБО» по исследуемым показателям не превышал ПДК, за исключением таких элементов, как ртуть (фаза созревания 4,1 ПДК), кадмий (начало эксперимента 8,2 ПДК, фаза созревания 30,9 ПДК), молибден (1,6 и 10,5 ПДК соответственно), свинец (1,2 и 4,6 ПДК соответственно) и формальдегид (6,6 и 17,5 ПДК соответственно).

Согласно работе Витковской С.Е. [2] к произведенному из органических компонентов ТБО компосту предъявляют более жесткие требования к допустимому содержанию таких элементов, как ртуть ($<0,3$ ПДК) и кадмий ($<0,7$ ПДК), по сравнению с требованиями, указанными в ГН 2.1.7.2041-06 [12], ГН 2.1.7.2042-06 [10], предъявляемыми почвам. Поэтому, если исходить из работы Витковской С.Е. [2], то превышение по этим элементам увеличивается у полученного компоста до 29 и 88 раз соответственно.

Изучая данные, представленные в таблице 1, можно заключить, что по сравнению с началом компостирования исследуемые элементы в процессе преобразований увеличились вследствие окислительных реакций на стадии созревания примерно до 2,5 (Cr, В, CH_2O), 3-5 (Pb, Se, Ba, Cu, Ni, NO_3^- , Cl^- , PO_4^{3-} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, SO_4^{2-}) и до 6 и более (Hg, Mo, Mn) ПДК. При этом следует отметить, что выявлена следующая закономерность: если содержание рассматриваемых веществ в процессе компостирования увеличивается, то изменчивость химических показателей по повторностям, наоборот, снижается, за исключением хлоридов, когда наблюдается однонаправленная изменчивость в сторону повышения, на 492% и 53% по сравнению с началом эксперимента. Для других исследуемых показателей, как это было отмечено выше, наблюдается в фазе созревания по сравнению с началом эксперимента снижение изменчивости примерно на 47–82%.

В таблице 2 показана динамика общего состава микрофлоры в компостируемом модельном субстрате «ТБО» по фазам развития.

Как видно из таблицы 2, на стадии лаг-фазы общая обсемененность гетеротрофными микроорганизмами была на порядок выше $2,5 \lg(\text{КОЕ г}^{-7})$ по сравнению с фазами мезофильного $6,1 \lg(\text{КОЕ г}^{-6})$ и термофильного развития ($4,1 \lg \text{КОЕ г}^{-6}$) и на два порядка $5,1 \lg(\text{КОЕ г}^{-5})$ по сравнению с фазой созревания. Полученные данные согласуются с работой Ярлыченко С.А. [24], где также наблюдалось снижение обсемененности бактериями с $4,3 \lg(\text{КОЕ г}^{-1})$ на начальной фазе развития до $4,0-4,8 \lg(\text{КОЕ г}^{-1})$ к концу компостирования. Особенностью в этой работе было то, что изменчивость по обсемененности бактериями-

гетеротрофами по фазам развития была по характеру криволинейной, т.е. если сначала наблюдался рост обсемененности до $6,2-7,8 \lg$ (КОЕ г⁻¹), а затем снижение, тогда как в нашем случае, как это показано в таблице 3, изменчивость по общей обсемененности гетеротрофными микроорганизмами имела прямолинейный характер с эффектом снижения обсемененности в компостируемой массе.

Таблица 3

Динамика количественного состава микрофлоры в компостируемом субстрате «ТБО»

Группа	Показатель	Фаза компостирования			
		лаг	мезофильная	термофильная	созревания
ОМЧ	$\bar{X} + m_{\bar{X}}$, КОЕ/г	$(2,5 \pm 3,6) \times 10^7$	$(6,1 \pm 5,4) \times 10^6$	$(4,1 \pm 1,9) \times 10^6$	$(5,1 \pm 1,7) \times 10^5$
	C_v , %	63	124	67	45
Колиморфные бактерии	$\bar{X} + m_{\bar{X}}$, КОЕ/г	$(2,5 \pm 2,9) \times 10^4$	$(1,2 \pm 0,8) \times 10^4$	$(7,2 \pm 1,9) \times 10^2$	$(1,5 \pm 0,7) \times 10^1$
	C_v , %	163	96	27	47
Актиномицеты	$\bar{X} + m_{\bar{X}}$, КОЕ/г	$(2,0 \pm 0,4) \times 10^6$	$(2,5 \pm 2,2) \times 10^1$	$(3,7 \pm 2,7) \times 10^3$	$(1,6 \pm 1,4) \times 10^2$
	C_v , %	31	122	101	119
Микромицеты	$\bar{X} + m_{\bar{X}}$, КОЕ/г	$(2,0 \pm 0,8) \times 10^3$	$(7,0 \pm 6,5) \times 10^3$	-	$(3,8 \pm 2,5) \times 10^2$
	C_v , %	71	131	-	91

Наиболее высокая степень изменчивости (124%) была отмечена на фазе мезофильного развития компостных процессов, тогда как наименьшая (45%) – на фазе созревания. Это свидетельствует о том, что по обсемененности гетеротрофные бактерии приобретают на конечной фазе развития компоста более устойчивый характер.

Санитарное состояние компостируемого модельного субстрата «ТБО» по фазам развития определяли по росту колоний на плотном питательном агаре колиморфных бактерий. Как известно, колиморфные бактерии, как группа бактерий семейства энтеробактерий, являются маркером фекального загрязнения [16; 19].

Как видно из таблицы 3, относительно высокая обсемененность обнаружена на стадиях лаг-фазы и мезофильной фазы развития, тогда как в термофильной фазе произошло резкое снижение обсемененности. Причина этому, безусловно, кроется в высоком температурном режиме этой фазы развития компоста (60 °С), что является губительным для патогенных и условно патогенных микроорганизмов [16]. На стадии созревания также был отмечен рост колоний колиморфных бактерий (меньше 10). По степени изменчивости обсемененности колиморфными бактериями в компостируемом субстрате отходов видим, что наиболее высокая степень изменчивости характерна для лаг-фазы (163%), далее следуют фазы мезофильная (96%), созревания (47%) и термофильная (27%). Следовательно, при

компостировании ТБО необходимо принять ряд дополнительных мер по улучшению санитарного состояния производимого компоста. Этого можно достичь либо путем повышения температуры до 70-80 °С, либо увеличением продолжительности термофильной фазы на 5-10 дней.

Особый интерес представляют актиномицеты, т.к. их поведение в процессе компостирования носит изменчивый характер. Как это видно из таблицы 3, на стадии лаг-фазы обсемененность находится на уровне 2,0 lg (КОЕ г⁻⁶) при изменчивости 31%, на мезофильной фазе развития обсемененность падает до 2,5 lg (КОЕ г⁻¹), тогда как степень изменчивости, наоборот, повышается и достигает максимального значения для данной группы таксонов в зависимости от стадии развития – 122%. На следующей фазе развития компоста (термофильной) обсемененность актиномицетов повышается до 3,7 lg (КОЕ г⁻³) при относительно высокой степени изменчивости (101%), тогда как на стадии созревания обсемененность, хотя незначительно, но снижается и доходит до 1,6 lg (КОЕ г⁻²) с одновременным повышением степени изменчивости до 119%.

При изучении динамики обсемененности компостируемой массы отходов микромицетами было обнаружено: во-первых, для лаг-фазы и фазы созревания рост колоний на плотном питательном агаре был отмечен для медленнорастущих микромицетов на 10-е сутки культивирования, тогда как для фазы мезофильного развития рост колоний быстро растущих микромицетов был отмечен уже через 72 часа культивирования; во-вторых, по обсемененности относительно высокий уровень разведения был отмечен для лаг-фазы и фазы мезофильного развития (2,0–7,0 lg (КОЕ г⁻³)), на стадии созревания обсемененность микромицетами находилась на уровне 3,8 lg (КОЕ г⁻²), тогда как для фазы термофильного развития рост колоний на плотном питательном агаре отсутствовал; в-третьих, наиболее высокая степень изменчивости для данной группы таксонов была отмечена в фазе мезофильного развития компоста (131%), низкая (71%) – на лаг-фазе.

Из вышеизложенного следуют **выводы**:

1) как перед началом эксперимента, так и после фазы созревания компостируемый модельный субстрат «ТБО» по исследуемым показателям не превышал ПДК, за исключением таких элементов, как Hg (фаза созревания 4,1 ПДК), Cd (начало эксперимента 8,2 ПДК, фаза созревания 30,9 ПДК), Mo (1,6 и 10,5 ПДК соответственно), Pb (1,2 и 4,6 ПДК соответственно) и CH₂O (6,6 и 17,5 ПДК соответственно);

2) микробиоценоз аэробно-биоразлагаемого субстрата «ТБО» существенно меняется в процессе компостирования по фазам: в процессе развития происходит снижение степени изменчивости, что свидетельствует о приобретении субстратом, вследствие воздействия одинаковых факторов, однородных для развития микроорганизмов свойств.

Список литературы

1. Белюченко И.С. Дисперсные и коллоидные системы отходов и их коагуляционные свойства // Вестник Северного Кавказа. - 2013. - Т. 9. - № 1. - С. 13-38.
2. Витковская С.Е. Твердые бытовые отходы: антропогенное звено биологического круговорота. – СПб. : АФИ, 2012. – 132 с.
3. ГОСТ Р 55571-2013. Удобрения органические на основе твердых бытовых отходов. Технические условия.
4. ГОСТ Р 53691-2009. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Паспорт отхода I-IV класса опасности. Основные требования.
5. ГОСТ Р 55570-2013. Удобрения органические. Биокомпосты.
6. ГОСТ Р 56004-2014. Удобрения органические. Вермикомпосты.
7. ГОСТ Р 51661.1-2000. Торф для приготовления компостов. Технические условия.
8. ГОСТ 12.1.007-76. Классификация и общие требования безопасности.
9. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
10. ГН 2.1.7.2042-06. ОДК химических веществ в почве.
11. ГН 2.1.7.12-1-2004. Перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) химических веществ в почве.
12. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве.
13. Джамалова Г.А. Антропогенная эпоха твердых коммунальных отходов // Известия СПбГТИ (ТУ). – 2003. - № 19 (45). - С. 93-97.
14. Методические указания по оценке степени опасности загрязнения почвы химическими веществами : утв. заместителем Главного государственного санитарного врача СССР от 13 марта 1987 г. № 4266-87.
15. МУ 2.1.7.730-99. Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почвы. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест.
16. Нетрусов А.И., Егорова М.А., Захарчек Л.М. и др. Практикум по микробиологии : учебное пособие для высш. уч. зав / под ред. Нетрусова А.И. - М. : Академия, 2005. – 608 с.
17. Сирина Н.В. Оценка воздействия на атмосферный воздух предприятий алюминиевой промышленности // Известия Иркутского государственного университета. – 2008. - Т. 1. - С. 181.

18. СанПиН 42-128-4433-87. Санитарные нормы допустимых концентраций (ПДК) химических веществ в почве.
19. Теппер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И. Практикум по микробиологии. - М. : Дрофа, 2005. – 256 с.
20. Химико-аналитический центр. - URL: http://analizvod.ru/pokazateli_pochva. Химический анализ почвы (дата обращения: 15.01.2016).
21. Чернова Н.М. Зоологическая характеристика компостов. - М. : Наука, 1966. – 157 с.
22. Черников В.А., Алексахин Р.М., Голубев А.В. и др. Агроэкология / под ред. Черникова В.А., Чекереса А.И. – М. : Колос, 2000. – 536 с.
23. Шугалей И.В., Гарабаджиу А.В., Илюшин М.А., Судариков А.М. Некоторые аспекты влияния алюминия и его соединений на живые организмы // Экологическая химия. – 2012. – 21 (3). – С. 172–186.
24. Ярлыченко С.А. Компостирование органической фракции твердых бытовых отходов с использованием бактериальных добавок : автореф. дис. ... канд. биол. наук по спец. 03.00.07-03 – Микробиология. - Казань, 2008. - 23 с.
25. Law concerning the quality and use of so-called other organic fertilisers (so-called BOOM decree). 's Gravenhage: Staatblad van het Koninkrijk. SDU: 613:1-45. In Dutch.Nederlanden. - 1991. - 45 p.
26. Kloke A. Contents of As, Cd, Cr, Pb, Hg and Ni in Plants Grown on Contaminated Soil // Papers Presented to the Symposium on the Effects of Air-born Pollution on Vegetation. - 1980. - Bd. 109. - Н. 81. - P. – 192 p.