

УДК 579.6:579.222

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

С.Ю. Селивановская, Н.А. Чижикова, С.А. Ярлыченко, А.А. Савельев

Аннотация

Предложен алгоритм выявления наиболее эффективных биотехнологий переработки органических отходов, включающий получение экспериментальных данных об изменении ряда показателей (содержание органического вещества, растворимого органического вещества и респираторной активности), построение нелинейных моделей, связывающих поведение каждого из показателей со временем трансформации компоста, вычисление средневзвешенного времени достижения компостом состояния стабильности по каждому из показателей с учетом различий в их естественной изменчивости, построение рейтинговой системы средневзвешенного времени достижения компостом стабильного состояния и проведение рандомизационного теста для оценки значимости различий полученных оценок времени. С применением предлагаемого алгоритма выявлено, что наиболее эффективным среди исследованных процессов является вариант компостирования с использованием препарата на основе *B. pumilus* KM-4F при его внесении в количестве 15%.

Ключевые слова: *B. pumilus*, компостирование, твердые бытовые отходы, биологические препараты, препарат «Тамир», бактериальные сообщества, обобщенные аддитивные модели, рейтинговая система, рандомизация.

Введение

Одним из этапов трансформации органических веществ микроорганизмами в природе является их превращение в гумус. Биохимические принципы этого процесса лежат в основе биотехнологии компостирования органических компонентов [1–4]. К числу таких компонентов относится органическая фракция твердых бытовых отходов (ТБО). В настоящее время известны различные схемы компостирования, отличающиеся системами аэрации и степенью механизации [5–7]. Публикации последних лет свидетельствуют о том, что изменять скорость компостирования возможно за счет использования биологических препаратов – ферментов, индивидуальных штаммов или сообществ микроорганизмов [8–11]. При выборе наиболее эффективных вариантов компостирования авторы в основном сравнивают значения ряда параметров, оцениваемых в конкретный момент времени [9–10, 12–13]. В то же время очевидно, что в качестве критерия эффективности компостирования целесообразно брать время, необходимое для завершения процесса. Традиционно для установления завершенности процесса определяют динамику тех параметров компостирования, изменение которых носит линейный характер, например, снижение содержания органического вещества. Те же параметры, изменение которых имеет нелиней-

ный характер, не принимаются во внимание в виду сложности интерпретации. Еще одной проблемой, которая осложняет процедуру выбора наиболее эффективных вариантов компостирования, является то, что время завершения процесса, установленное для одного и того же варианта компостирования на основе учета различных параметров, может существенно различаться.

В данной работе представлен подход, позволяющий установить наиболее эффективный способ компостирования органических отходов с применением биологических препаратов, основанный на математическом моделировании совокупности экспериментальных результатов.

1. Методика

Процесс компостирования осуществляли в емкостях объемом 20 л, накрытых теплоизоляционным материалом. Для компостирования использовали 15 кг органической фракции ТБО, содержащей садовые отходы в виде опавшей листвы, пищевые отходы, бумагу и текстиль в соотношении по массе 68 : 20 : 11 : 1. Процесс компостирования осуществляли с использованием биологических препаратов, представляющих собой культуральную жидкость вместе с клетками микроорганизмов сообщества или индивидуального штамма, выращенных на синтетической солевой среде с использованием целлюлозы в качестве единственного источника углерода. Препараты вносили в компостируемую смесь в соотношении объем препарата к массе отходов 1 : 10 – 2 : 10. В контрольном варианте использовали аналогичное количество водопроводной воды. В итоге были получены шесть вариантов компостных смесей: К – контрольный вариант без биологической добавки, Т – вариант с добавлением коммерческого препарата «Тамир», СБГ – вариант с добавлением 15% препарата в виде смешанного сообщества микроорганизмов, СБ – вариант с добавлением 15% бактериального сообщества, Бац10 – вариант с добавлением 10% препарата на основе чистой культуры *Bacillus pumilus* КМ-4F и 5% водопроводной воды, Бац15 – вариант с добавлением 15% чистой культуры *B. pumilus* КМ-4F, Бац20 – вариант с добавлением 20% чистой культуры *B. pumilus* КМ-4F. Характеристики биологических препаратов представлены в табл. 1. Компостируемые смеси перемешивали один раз в неделю в первый месяц компостирования, а затем один раз в две недели.

Пробы отбирали в пяти точках компостных смесей в количестве 100 г каждая, после чего пробы усредняли методом квартования. Отбор проб производили на 1, 14, 21, 36, 43, 50, 57, 71, 83, 106 и 124-е сутки компостирования.

Содержание органического вещества (ОВ) определяли в соответствии с ГОСТ 26714–85 [14], растворимого органического углерода (РОУ) в соответствии с ISO 14240–2 [15]. Определение респираторной активности компостов проводили в соответствии с [16].

Для описания экспериментальных данных использовали нелинейные обобщенные аддитивные модели (generalized additive models, GAM) [17], реализованные в пакете mgcv [18] языка статистического программирования R [19]. Данный программный пакет позволяет подобрать сложность, степень нелинейности модели на основе перекрестной проверки (GCV criterion) [20].

Табл. 1

Характеристики биологических препаратов, используемых в процессе компостирования

Шифр препарата	Препарат	Удельная ЦА, ед. · г ⁻¹	Численность бактерий, lg КОЕ · мл ⁻¹	Численность микромицетов, lg КОЕ · мл ⁻¹
Бац	<i>Bacillus pumilus</i> КМ-4F	65.8 ± 1.3	6.4 ± 0.3	–
СБГ	Сообщество бактерий и грибов	4.5 ± 0.2	6.1 ± 0.3	2.4 ± 0.2
СБ	Сообщество бактерий	13.7 ± 0.5	8.2 ± 0.4	–
Т	«Тамир»	–	2.2 ± 0.1	2.7 ± 0.1

Средневзвешенное время достижения компостом состояния стабильности (далее «стабилизации») рассчитывали по формуле:

$$Z = \sum_{i=1}^n a_i x_i / \sum_{i=1}^n x_i,$$

где Z – средневзвешенное время достижения компостом состояния стабильности, сутки; a_i – время достижения i -м показателем значения, соответствующего качеству зрелого компоста, сутки; x_i – вес оценки времени a_i . В предположении, что ошибки для различных показателей независимы, для получения наилучшей оценки истинного времени стабилизации, то есть оценки с минимальной дисперсией, в качестве весов использовали величины, обратные среднеквадратическому отклонению показателя в точке достижения им значений стабильного компоста.

Для определения значимости различия оценки времени стабилизации для оптимального варианта компостирования от оценок времени для остальных вариантов был использован метод рандомизации [21]. Для этого использовали выборочное распределение динамики показателей (случайные выборки подмножеств их значений), по которым строили модели зависимости показателей от времени компостирования и рассчитывали средневзвешенную оценку времени стабилизации. Полученную оценку времени можно рассматривать как выборочное значение для истинного времени. Данная процедура была повторена по 1000 раз для каждого варианта компостирования, и было получено по 1000 средневзвешенных оценок времени стабилизации. Медианы выборочных распределений средневзвешенных оценок для разных вариантов были сравнены с помощью одностороннего непараметрического теста Вилкоксона ранговой суммы.

2. Результаты и их обсуждение

При разработке алгоритма определения наиболее оптимального способа компостирования органических отходов исходили из следующих посылок. Известно, что эффективность применения компоста в качестве почвенного мелиоранта напрямую зависит от степени его стабильности. Понятие стабильности компоста относится к уровню активности микробной биомассы или устойчивости органического вещества к дальнейшей деградации. Согласно данным, представленным

в литературе, стабильные компосты имеют следующие характеристики: содержание РОУ – $10 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$, респираторная активность – $2 \text{ мг } \text{CO}_2\text{-C} \cdot \text{г}^{-1} \cdot 24 \text{ ч}^{-1}$, а рекомендуемое содержание ОВ составляет 40% [7, 22–27]. Достижение компостом этих характеристик может свидетельствовать об успешном завершении процесса компостирования.

Для получения исходных экспериментальных данных было проведено компостирование органической фракции твердых бытовых отходов в семи вариантах. Варианты различались внесением различных биологических препаратов, используемых для улучшения процесса компостирования.

Биологические препараты представляли собой культуральную жидкость с клетками микроорганизмов, выращенных на солевой среде с целлюлозой в качестве единственного источника углерода. В состав четырех из шести биологических препаратов входили только бактерии, два препарата содержали сообщества бактерий и микромицетов.

В динамике процесса компостирования были определены содержание ОВ, РОУ и респираторная активность. Начальное содержание ОВ в компостных смесях составляло 87%, к концу эксперимента это значение снизилось до 46, 45, 38, 36, 46, 35 и 37% для вариантов К, Т, СБГ, СБ, Бац10, Бац15 и Бац20 соответственно. Такое изменение имеет классический характер и связано с улетучиванием CO_2 , обусловленным действием микроорганизмов. Снижение содержания ОВ до 20–40% отмечено и другими авторами при компостировании сельскохозяйственных, пищевых отходов, отходов садоводства и органической фракции ТБО [5, 26, 28–30].

В исходных компостных смесях содержание РОУ находилось на уровне $49.7 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$, что согласуется с данными, представленными в литературе [8, 26, 29, 31]. После 4 месяцев компостирования содержание РОУ варьировало на уровне $3.8\text{--}8.0 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$. Аналогичные результаты были получены и другими авторами [26, 27]. Выявлено, что скорость изменения параметра максимальна в течение первых трех недель и демонстрирует тенденцию к снижению в последующий период. Установленная зависимость находится в русле современных представлений об изменении содержания РОУ в процессе компостирования. Данные, опубликованные в литературе, разнятся лишь временем, в течение которого наблюдается максимальное его снижение, которое колеблется от 5–7 суток [26, 31] до 2–3 месяцев [8]. Внесение биологических добавок не оказало влияния на уменьшение периода деградации доступной части органического вещества.

При анализе динамики изменения респираторной активности компостных смесей установлено, что в течение первых двух недель происходило увеличение ее уровня во всех вариантах опыта. Так, при начальном уровне респираторной активности $6.2 \text{ мг } \text{CO}_2\text{-C} \cdot \text{г}^{-1} \cdot 24 \text{ ч}^{-1}$ к 14–21-м суткам значения этого показателя увеличились в 1.4–3.6 раз. Максимальный уровень активности 22.4 и $21.9 \text{ мг } \text{CO}_2\text{-C} \cdot \text{г}^{-1} \cdot 24 \text{ ч}^{-1}$ был отмечен в вариантах компостирования с использованием СБ и Бац15 соответственно. Последующие три недели характеризовались снижением респираторной активности до исходного уровня; а начиная с 50-х суток наблюдался второй пик респираторной активности. С 80-х суток уровень респирации не подвергался существенным флуктуациям. К концу

компостирования респираторная активность составила 2.1, 2.0, 1.8, 1.5, 1.9, 1.2 и 1.7 мг $\text{CO}_2\text{-C} \cdot \text{г}^{-1} \cdot 24 \text{ ч}^{-1}$ для вариантов К, Т, СБГ, СБ, Бац10, Бац15 и Бац20 соответственно.

Для того чтобы выявить, какой из вариантов компостирования является предпочтительным, на следующем этапе необходимо было определить время, достаточное для их стабилизации. Поскольку непосредственно в эксперименте не удалось зафиксировать время, при котором компостные смеси приобретали свойства стабильного компоста, были построены модели, связывающие поведение каждого из показателей со временем трансформации компоста.

Так как изменение показателей во времени нелинейно, были использованы нелинейные обобщенные аддитивные модели, главным преимуществом которых является то, что они позволяют моделировать достаточно сложные зависимости, не укладывающиеся в рамки традиционных классических нелинейных моделей. Сложность, степень нелинейности моделей была определена с помощью процедуры перекрестной проверки, реализованной в программном пакете *mgcv*. Для моделей изменения содержания ОВ сложность моделей была ограничена 3 степенями свободы, так как для каждого варианта компостирования было проведено небольшое число измерений. Для моделей изменения содержания двух других параметров число степеней свободы составило от 7 до 9. В качестве примера на рис. 1 представлены модели изменения показателей компостирования при традиционном процессе (К) и при использовании биологического препарата Бац15.

На основе оптимальных моделей для каждого показателя каждого варианта компостирования были определены значения времени стабилизации (табл. 2).

При анализе каждого из показателей процесса компостирования можно выделить наиболее эффективный вариант биологической добавки. Однако для итогового заключения необходимо учитывать результаты всех показателей процесса компостирования в совокупности. Для этого нами предложено применить рейтинговую систему, базирующуюся на средневзвешенном времени достижения компостом стабильного состояния. Средневзвешенное время достижения компостом состояния стабильности включает как само время достижения компостом стабильного состояния по каждому из показателей (точнее, его оценку), так и вес оценок, учитывающий степень их неопределенности для каждого из показателей. Перед вычислением весов данные для каждого показателя были стандартизованы делением на среднеквадратическое отклонение. Вес для показателей в каждой схеме компостирования вычисляли обратно пропорциональным среднеквадратической ошибке прогноза показателя нелинейной модели в точке достижения им оптимального прогнозного значения. Таким образом, чем выше точность, с которой возможно определение значения показателя (содержания ОВ, РОУ, респираторной активности) в точке достижения показателем искомого значения, тем больший вклад вносит этот показатель в оценку средневзвешенного времени достижения компостом состояния стабильности. Графическое изображение точности определения значения показателя в виде ошибки прогноза представлено на рис. 1.

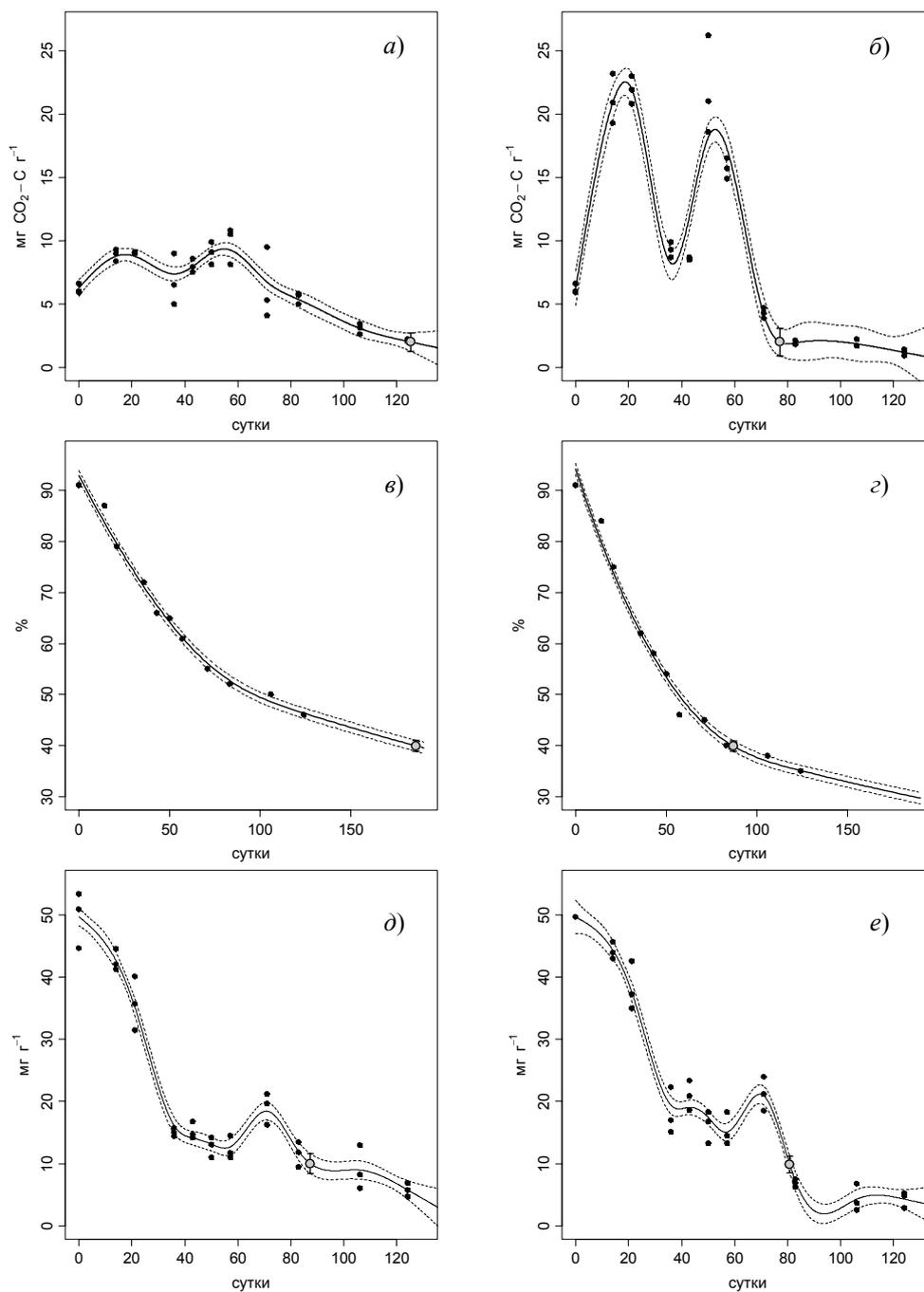


Рис. 1. Модели изменения свойств компоста от времени компостирования: *а), б)* респираторная активность; *в), з)* содержание органического вещества; *д), е)* содержание растворимого органического углерода. *а), в), д)* компостирование отходов по традиционному способу; *б), з), е)* компостирование отходов с использованием препарата Бац15. Сплошная линия – прогноз модели, пунктирная линия – среднеквадратическая ошибка прогноза. Черные точки – измеренные значения показателя. Серой точкой с отрезком показано время достижения показателем значения, соответствующего стабильному компосту, и ошибка прогноза в этой точке

Табл. 2

Оценка времени достижения компостом состояния стабильности

Вариант	Показатель						Среднее взвешенное время
	Респираторная активность		Содержание ОВ		Содержание РОУ		
	1*	2**	1*	2**	1*	2**	
К	124	0.45	183	0.24	87	0.24	132
Т	124	1.00	157	0.24	87	0.24	123
СБГ	118	0.14	115	0.25	85	0.19	106
СБ	115	0.15	96	0.26	83	0.30	94
Бац10	107	0.13	168	0.25	81	0.23	122
Бац15	77	0.14	86	0.25	81	0.28	82
Бац20	76	0.14	86	0.25	81	0.28	82

1* – время достижения показателем значения, соответствующего качеству стабильного компоста, сутки.

2** – вес оценки времени для вычисления среднего взвешенного времени стабилизации: обратно пропорционален изменчивости показателя в точке времени, соответствующей достижению им значения стабильного компоста.

Как видно из результатов, представленных в табл. 2, наиболее эффективной схемой процесса является компостирование органической фракции ТБО с использованием биологических препаратов Бац15 и Бац20. Однако, исходя из того, что исходные данные, получаемые с помощью биологических методов, характеризуются большой вариабельностью, необходимо было оценить значимость различия времени достижения компостом стабильного состояния при использовании различных биологических препаратов. Поскольку компостирование с препаратом Бац15 было признано оптимальным, то именно для этого варианта компостирования и определяли, значимо ли отличается его обнаруженный положительный эффект от других вариантов компостирования. С этой целью был проведен рандомизационный тест. Для этого из данных, полученных для каждого варианта компостирования, случайным образом удаляли несколько значений показателя, по данным случайных выборок динамики показателей строили модели зависимости показателей от времени компостирования и рассчитывали средневзвешенную оценку времени стабилизации. Из данных по респираторной активности и содержанию РОУ удаляли по 5 измерений, из данных по содержанию ОВ – по 2 измерения. Данная процедура была проведена 1000 раз и для каждого варианта компостирования были получены 1000 средневзвешенных оценок времени стабилизации. Гистограммы распределения средневзвешенного времени стабилизации представлены на рис. 2. Проведенный перестановочный тест позволил получить более устойчивую оценку времени стабилизации, которое составило 129, 126, 107, 96, 129, 83, 87 суток для вариантов К, Т, СБГ, СБ, Бац10, Бац15, Бац20 соответственно (вычислено как медиана распределений оценок времени). Медианы полученных распределений средневзвешенных оценок времени стабилизации были сравнены с помощью одностороннего непараметрического теста Вилкоксона ранговой суммы (также известен как тест Манна – Уитни). Было проведено попарное сравнение медиан распределения оценок времени стабилизации при использовании препарата Бац15 и всех остальных вариантов биологических препаратов (К, Т, СБГ, СБ, Бац10, Бац20). В данном тесте H_0 – нет различий между медианами распределений; H_1 – медиана распределения оценок

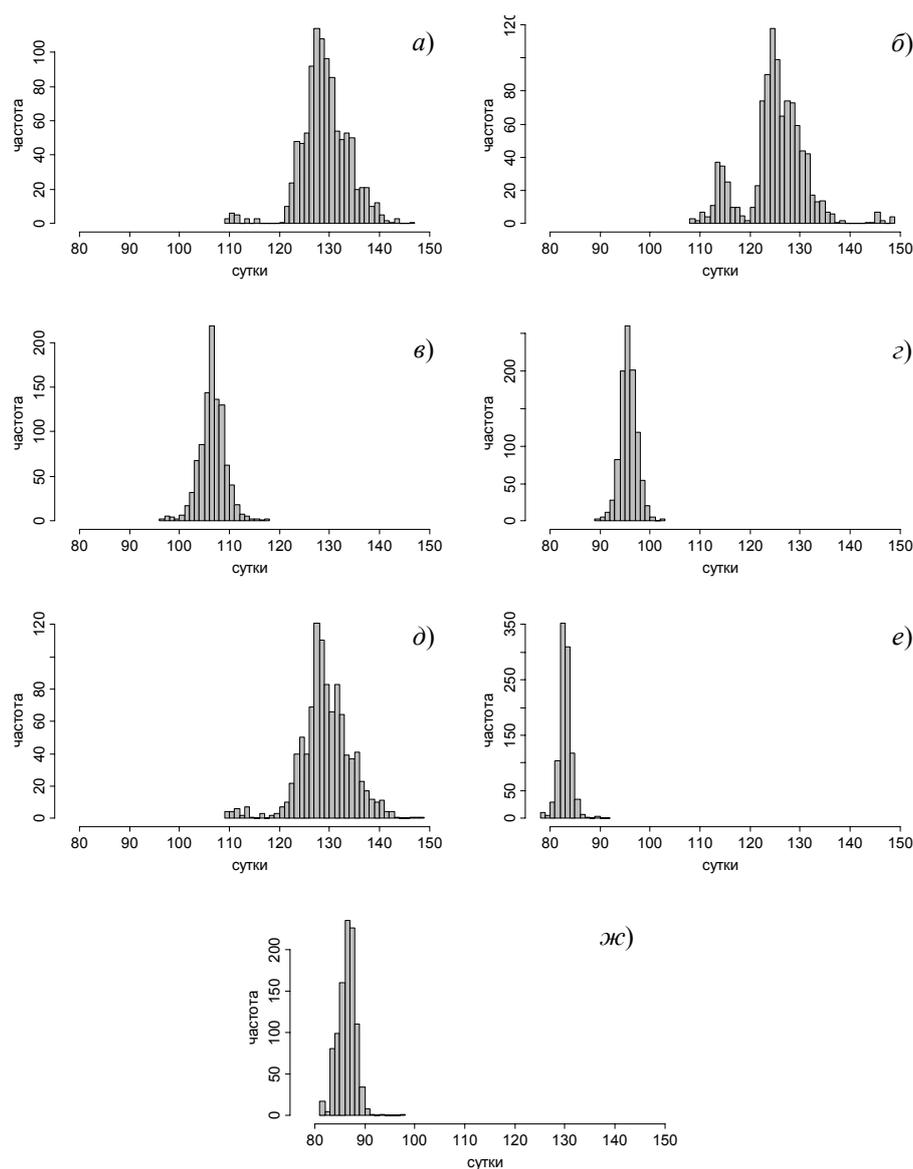


Рис. 2. Распределения средневзвешенных оценок времени достижения компостом оптимальных свойств, полученные с помощью перестановочного теста. Варианты компостирования а) К, б) Т, в) СБГ, г) СБ, д) Бац10, е) Бац15, ж) Бац20

времени при использовании Бац15 меньше, чем медиана распределения при использовании альтернативного биологического препарата. Наблюденный уровень значимости в каждом варианте сравнения составил меньше 0.001, что свидетельствует о том, что медиана распределения средневзвешенных оценок времени достижения компостом стабильного состояния при использовании препарата Бац15 значимо меньше, чем медианы распределений оценок времени, соответствующих использованию других биологических препаратов. Полученные данные достоверно подтвердили, что наиболее эффективным среди ис-

следованных процессов является вариант компостирования с использованием препарата на основе *B. pumilus* КМ-4F при его внесении в количестве 15%.

Таким образом, предложенный нами подход, основанный на вычислении средневзвешенного времени достижения компостом состояния стабильности, которое учитывает естественную изменчивость исходных экспериментальных данных, может быть использован для выявления наиболее эффективных биотехнологий переработки органических отходов.

Summary

S.Yu. Selivanovskaya, N.A. Chizhikova, S.A. Yarlychenko, A.A. Saveljev. Estimating the Efficiency of Organic Waste Treatment Biotechnologies.

An algorithm for detecting the most effective biotechnologies of waste treatment was proposed. It includes obtaining experimental data about changes of some indicators (content of organic matter, soluble organic matter and respiratory activity). This step is followed by nonlinear modelling of the indicators' behavior during the process of composting. This algorithm also includes a rating system based on average-weighted time of compost stability, taking into account intrinsic variability of each characteristic examined. Estimated time of compost stability is then validated by randomization procedure. Proposed algorithm revealed the most effective variant of composting to be the one using the inoculation of compost mixture by *B. pumilus* at 15% ratio.

Key words: *B. pumilus*, composting, solid domestic waste, biological agents, "Tamir" agent, bacterial communities, generalized additive models, rating system, bootstrapping.

Литература

1. *Page A.L.* Use of reclaimed water and sludge in food crop production. – Washington, D. C.: Nat. Acad. Press, 1996. – 177 p.
2. *Epstein E.* The science of composting. – Lancaster, Basel: Technomic publ. comp., 1997. – 487 p.
3. *Hassen A., Belguith K., Jedidi N., Cherif A., Cherif M., Boudabous A.* Microbial characterization during composting of municipal solid waste // *Biores. Technol.* – 2001. – V. 80, No 3. – P. 217–225.
4. *Cunha-Queda A. C., Ribeiro H. M., Ramos A., Cabral F.* Study of biochemical and microbiological parameters during composting of pine and eucalyptus burk // *Biores. Technol.* – 2007. – V. 98, No 17. – P. 3213–3220.
5. *Mato S., Otero D., Garcia M.* Composting of < 100 mm fraction of municipal solid waste // *Waste Manag. Res.* – 1994. – V. 12, No 5. – P. 315–325.
6. *Li L., Cunningham C.J., Pas V., Philp J.C., Barry D.A., Anderson P.* Field trial of a new aeration system for enhancing biodegradation in a biopile // *Waste Manag.* – 2004. – V. 24, No 2. – P. 127–137.
7. *Wang P., Changa C.M., Watson M.E., Dick W.A., Chen Y., Hoitink H.A.* Maturity indices for composted dairy and pig manures // *Soil Biol. Biochem.* – 2004. – V. 36, No 5. – P. 767–776.
8. *Tognetti C., Mazzarino M.J., Laos F.* Improving the quality of municipal organic waste compost // *Biores. Technol.* – 2007. – V. 98, No 5. – P. 1067–1076.
9. *Wei Z., Xi B., Zhao Y., Wang S., Liu H., Jiang Y.* Effect of inoculating microbes in municipal solid waste composting on characteristics of humic acid // *Chemosphere.* – 2007. – V. 68, No 2. – P. 368–374.

10. *Xi B., Zhang G., Liu H.* Process kinetics of inoculation composting of municipal solid waste // *J. Hazard. Mat.* – 2005. – V. 124, No 1–3. – P. 165–172.
11. *Zeng G., Huang D., Huang G., Hu T., Jiang X., Feng C., Chen Y., Tang L., Liu H.* Composting of lead-contaminated solid waste with inocula of white-rot fungus // *Biores. Technol.* – 2007. – V. 98, No 2. – P. 320–326.
12. *Said-Pullicino D., Erriquens F., Gigliotti G.* Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity // *Biores. Technol.* – 2007. – V. 98, No 9. – P. 1822–1831.
13. *Baffi C., DellAbate M., Nassisi A., Silva S., Benedetti A., Genevini P., Adani F.* Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity // *Soil Biol. Biochem.* – 2007. – V. 9, No 6. – P. 1284–1293.
14. ГОСТ 26714–85. Метод определения золы. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 5 с.
15. ISO 14240–2. Soil quality – Determination of soil microbial biomass. Part 2: Fumigation-extraction method. – International standard, 1997. – 12 p.
16. *Schinner F., Ohlinger R., Kandeler E., Margesin R.* Methods in soil Biology. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1995. – 230 p.
17. *Hastie T., Tibshirani R.* Generalized additive models. – London, New York: Chapman and Hall, 1990. – 352 p.
18. *Wood S.N.* Mgcv: GAMs and Generalized Ridge Regression for R // *R News.* – 2001. – V. 1, No 2. – P. 20–25.
19. R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. [Электронный ресурс]. – 2000. – Режим доступа: <http://www.R-project.org>.
20. *Wood S.N., Augustin N.H.* GAMs with integrated model selection using penalized regression splines and applications to environmental modelling // *Ecol. Model.* – 2002. – V. 157, No 2. – P. 157–177.
21. *Davison A.C., Hinkley D.V.* Bootstrap Methods and Their Application. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997. – 592 p.
22. *Касатиков В.А.* Использование ОСВ и компостов из твердых бытовых отходов // Охрана окружающей среды: химизация сельского хозяйства. – 1989. – № 11. – С. 39–41.
23. *García C., Hernández T., Costa F.* Changes in carbon fractions during composting and maturation of organic wastes // *Environm. Manag.* – 1991. – V. 15, No 3. – P. 433–439.
24. *Hue N.V., Liu J.* Predicting compost stability // *Compost Sci. Util.* – 1995. – V. 3, No 2. – P. 8–15.
25. *Eggen T., Vethe O.* Stability indices for different composts // *Compost Sci. Util.* – 2001. – V. 9, No 1. – P. 19–26.
26. *Benito M., Masaguer A., Moliner A., Arrigo N., Palma R.M.* Chemical and microbiological parameters for the characterization of the stability and maturity of pruning waste compost // *Biol. Fertil. Soils.* – 2003. – V. 37, No 3. – P. 184–189.
27. *Zmora-Nahum S., Markovich O., Tarchitzky J., Chen Y.* Dissolved organic carbon (DOS) as parameter of compost maturity // *Soil Biol. Biochem.* – 2005. – V. 37, No 11. – P. 2109–2116.
28. *Iannotti D.A., Grebus M.E., Toth B.L., Madden L.V., Hoitink H.A.J.* Oxygen Respirometry to Assess Stability and Maturity of Composted Municipal Solid Waste // *J. Environ. Qual.* – 1994. – V. 23, No 6. – P. 1177–1183.

29. *Bernal M.P., Navarro A., Cegarra A., Garcia D.* Carbon and nitrogen transformation during composting of sweet sorghum bagasse // *Biol. Fertil. Soils.* – 1996. – V. 22, No 1–2. – P. 141–148.
30. *Iyengar S.R., Bhave P.P.* In-vessel composting of household wastes // *Waste Manag.* – 2006. – V. 26, No 10. – P. 1070–1080.
31. *Mondini C., Fornasier F., Sinicco T.* Enzymatic activity as a parameter for the characterization of the composting process // *Soil Biol. Biochem.* – 2004. – V. 36, No 10. – P. 1587–1594.

Поступила в редакцию
20.03.09

Селивановская Светлана Юрьевна – доктор биологических наук, профессор кафедры прикладной экологии Казанского государственного университета.

E-mail: Svetlana.Selivanovskaya@ksu.ru

Чижикова Нелли Александровна – кандидат биологических наук, ассистент кафедры моделирования экосистем Казанского государственного университета.

E-mail: Chizhikova_n@rambler.ru

Ярлыченко Светлана Александровна – кандидат биологических наук, коммерческий директор Казанского завода химических реактивов.

Савельев Анатолий Александрович – доктор биологических наук, профессор кафедры моделирования экосистем Казанского государственного университета.

E-mail: saa@ksu.ru