

УДК 502.55

СОВМЕСТНАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВ С ПОЛУЧЕНИЕМ ПОЛЕЗНЫХ ПРОДУКТОВ И БИОГАЗА

П.Ю. Галицкая, П.А. Зверева, С.Ю. Селивановская

Аннотация

Исследовано влияние состава смесей осадка сточных вод и отходов растительного происхождения, их предварительной инокуляции метаногенным сообществом и продолжительности процесса на выход биогаза при анаэробном сбраживании в термофильном режиме. Определено воздействие продуктов сбраживания на почвенное микробное сообщество, а также биометрические показатели растений овса (*Avena sativa* L.) Показана принципиальная возможность совместного сбраживания отходов. Наиболее предпочтительным с точки зрения выхода биогаза является смесь осадка сточных вод и силоса. Продукты сбраживания этой смеси обладают удобрительными свойствами.

Ключевые слова: анаэробное сбраживание, органические отходы, биогаз, нетрадиционные удобрения.

Введение

Накопление бытовых и промышленных отходов является актуальной экологической проблемой [1, 2]. Большая часть образующихся отходов относится к группе органических [3]. Разработка способов утилизации отходов – одно из перспективных направлений, позволяющих получить как экологический, так и экономический эффект. Одним из методов утилизации органических отходов является анаэробное сбраживание [4]. Такой вид переработки имеет ряд преимуществ: образование меньшего количества вторичных отходов по сравнению с аэробной утилизацией, эффективная переработка влажных (60% и более) отходов, уничтожение патогенных организмов, особенно при использовании многостадийных реакторов или при использовании промежуточного этапа – пастеризации), возможность использования продуктов брожения в качестве удобрения, образование экологически чистого топлива – биогаза [5–8].

Характеристики отходов оказывают значительное влияние как на процесс сбраживания, так и на выход биогаза. К таким характеристикам относятся: содержание и состав органического вещества, размер частиц, влажность, pH, присутствие токсичных и трудоразлагаемых веществ и др. [2, 9, 10].

Преодолеть негативные факторы возможно при совместном сбраживании отходов, обладающих различными характеристиками [10]. Увеличение выхода биогаза за счет сбраживания осадков бытовых сточных вод с отходами сельскохозяйственного производства было продемонстрировано рядом авторов ранее [11–13]. В то же время основные публикации посвящены сбраживанию бытовых

осадков сточных вод, тогда как в РФ осадки образуются при очистке смешенных (промышленных и бытовых) сточных вод, что приводит к накоплению в них токсикантов [14]. Эффективность сбраживания таких осадков и их смесей с растительными отходами изучена недостаточно.

Целью настоящей работы является анализ эффективности совместной анаэробной переработки ОСВ и отходов растительного происхождения.

Методы и материалы

В качестве объекта исследования служил осадок сточных вод (ОСВ), смеси ОСВ с силосом кукурузы, потерявшим потребительские свойства и лузгой подсолнечной (табл. 1). Образцы сбраживали с добавлением 10% по (массе) инокулята (бродильная масса после предыдущего сбраживания). Один из вариантов опыта предусматривал сбраживание ОСВ без инокулята.

Табл. 1

Состав смесей для анаэробного сбраживания

Наименование варианта	Состав смеси брожения
ОСВ	Осадок сточных вод (ОСВ+И)
ОСВ+И	Осадок сточных вод с добавлением инокулята
ОСВ+СЕ+И	Осадок сточных вод с добавлением силоса кукурузы, потерявшего потребительские свойства, в соотношении 7 : 3 по массе, и инокулята
ОСВ+СИ+И	Осадок сточных вод с добавлением лузги подсолнечной, потерявшей потребительские свойства, в соотношении 7 : 3 по массе, и инокулята

Анаэробное сбраживание осуществляли в герметично закрытых емкостях при температуре 55.5 °С. Каждые 12 часов емкости перемешивали в течение 30 с. Брожение осуществляли в течение 14 и 21 сут. Перед началом инкубирования рН смесей доводили до 7.5 с использованием известкового молока. Влажность исходных смесей составляла 92–96%.

При оценке удобрительных свойств продуктов брожения вносили их в урбозем (в дозе 30 т/га), предварительно увлажненный до 60% от общей влагоемкости, и инкубировали при комнатной температуре (22 °С) в течение 30 сут. По окончании инкубирования в почве проводили определение микробной биомассы и респираторной активности. Затем почвы засевали семенами овса и через 14 сут оценивали биометрические показатели всходов.

Респираторную активность почв определяли согласно ISO 14240-1 [15].

Биомассу микроорганизмов оценивали на основании определения субстрат-индуцированного дыхания согласно ISO 14240-2 [16].

Биотестирование почвенных образцов, обработанных продуктами брожения, проводили с использованием семян овса *Avena sativa* L. согласно ISO 11269-1 [17].

Измерение всех параметров проводили не менее чем в трехкратной повторности. На всех графиках представлено среднее значение и значение среднеквадратического отклонения. Достоверность различий средних оценивали по критерию Стьюдента ($P < 0.05$).

Результаты и их обсуждение

Одним из параметров, отражающих эффективность сбраживания субстрата, является количество выделившегося биогаза [9, 10]. На первом этапе работы было оценено влияние следующих факторов на процесс газообразования: 1) внесение инокулята; 2) состав смесей, подвергающихся брожению. Влияние первого фактора оценивали на исходном ОСВ. В обоих случаях выделение биогаза активно происходит в течение 15–16 сут, а затем процесс затухает (рис. 1, *а* и *б*). На максимальную активность процесса газообразования при сбраживании навоза, органической фракции твердых бытовых отходов, растительных отходов в первые 2–3 недели указывает ряд авторов [18–20]. Внесение инокулята стимулирует процесс – суммарный объем выделившегося биогаза в варианте ОСВ+И в 1.5 раз превышает объем в варианте ОСВ. Дальнейшие опыты проводили с инокуляцией смесей брожения.

На следующем этапе оценивали влияние состава смесей брожения на эффективность выделения биогаза. Период максимального газовыделения различается для вариантов смесей. Так, в варианте ОСВ+СЕ+И наибольшее количество газа (51%) выделяется в первые сутки (рис. 1, *в*). Далее процесс газовыделения становится менее интенсивным: ежедневно выделяется 2–8% от суммарного объема газа. На 17-е сутки процесс полностью прекращается. При сбраживании смеси, состоящей из ОСВ и силоса, процесс газовыделения происходит более равномерно: в первые сутки выделяется 12%, в последующие 15 суток колебания объема газа незначительны (от 4% до 11% от суммарного объема газа) (рис. 1, *г*). Начиная с 17-х суток выделение биогаза не наблюдалось.

По суммарному объему выделившегося биогаза варианты смесей составляют ряд: ОСВ+СИ+И > ОСВ+И > ОСВ > ОСВ+СЕ+И – 2361, 1299, 878 и 813 мл/кг сырой массы соответственно. Добавление силоса приводит к увеличению выхода биогаза в 1.8 раза по сравнению с вариантом ОСВ+И и в 2.7 раз по сравнению с вариантом ОСВ. О способности силоса кукурузы к сбраживанию сообщалось ранее [21]. При сбраживании смеси, состоящей из ОСВ и лузги подсолнечной, отмечается меньшее (на 7%) количество выделяющегося биогаза по сравнению с ОСВ. Это, вероятно, связано с низкой доступностью органических соединений (клетчатки, лигнина), входящих в состав лузги [22]. Такое предположение подтверждается данными Демирера и Чена [9], показавшими, что из-за присутствия в составе субстратов лигнина и клетчатки эффективность метанового брожения, оцененная по интенсивности газовыделения, снижается более чем в 2 раза.

Необходимо отметить, что во всех вариантах основное количество биогаза (более 90%) выделяется за 14 сут брожения. При этом наиболее интенсивно газообразование происходит в варианте ОСВ+СИ+И (2153 мл), наименее – в вариантах ОСВ+СЕ+И (796 мл).

Продукты брожения целесообразно использовать в качестве нетрадиционных удобрений, поскольку они содержат органические вещества. С целью определения удобрительных свойств продукты брожения вносили в урбозем в количестве 30 т/га и через 30 сут определяли воздействие на почвенное микробное сообщество и растения.

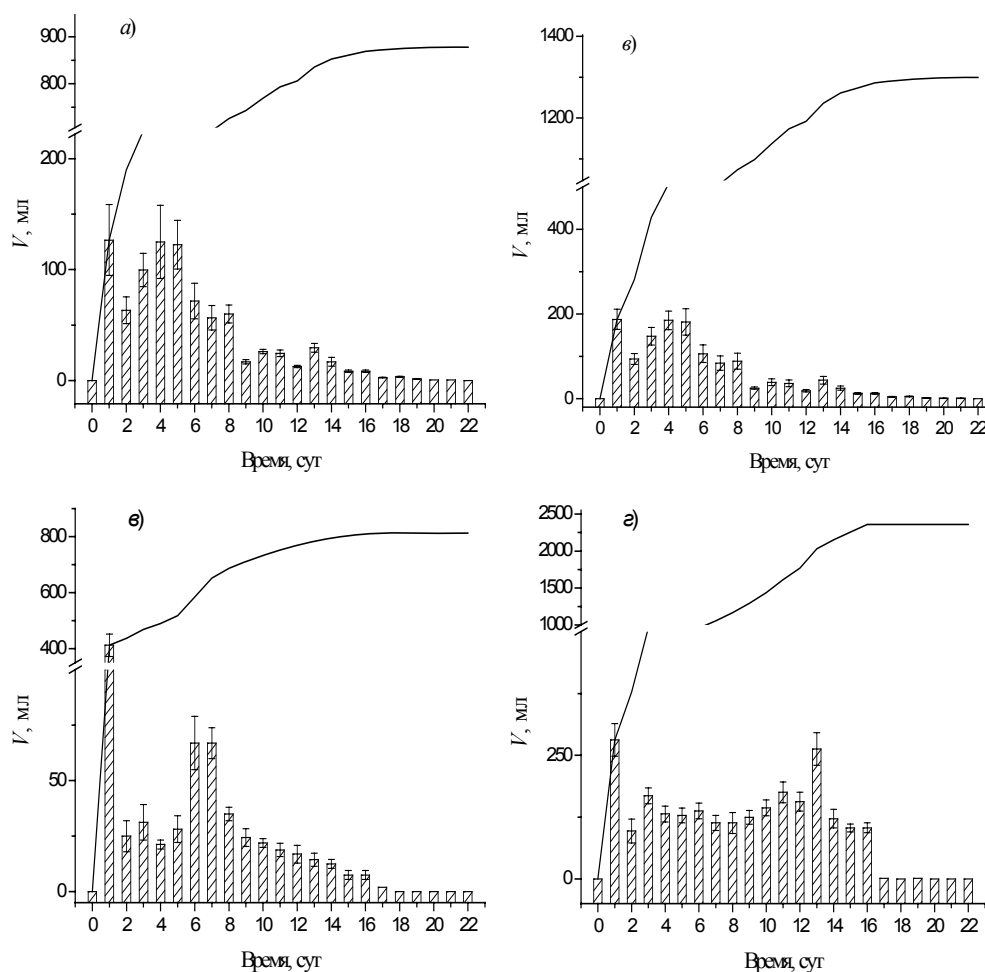


Рис. 1. Ежесуточный и кумулятивный выход биогаза при сбраживании ОСВ (а), ОСВ+И (б), ОСВ+СЕ+И (в), ОСВ+СИ+И (г)

Для оценки воздействия продуктов брожения на состояние аборигенной микрофлоры почв было выбрано 2 показателя: биомасса и респираторная активность. Уровень микробной биомассы является одним из наиболее чувствительных индикаторов качества среды [23–26]. Широко используется в лабораторных и полевых исследованиях и интенсивность минерализации органического вещества почвы как показатель, чувствительный к токсическому действию [20]. Кроме того, показатель базального дыхания часто используется в качестве критерия для оценки почвенного плодородия и отражает доступность органического вещества для почвенных микроорганизмов, поскольку весь углерод, теряемый почвой с дыханием, должен проходить через микробный пул [27].

Уровень микробной биомассы в почвах, обработанных продуктами брожения, отобранными через 14 и 21 сут сбраживания представлен на рис. 2. Как видно из полученных данных, во всех случаях внесение продуктов брожения в 2.3–5.1 раз увеличивает уровень микробной биомассы в почве по сравнению

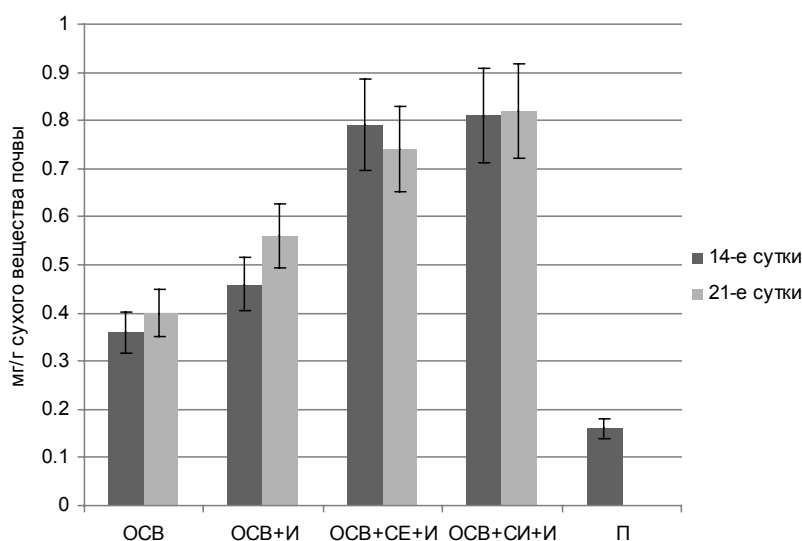


Рис. 2. Микробная биомасса в почвенных образцах, обработанных отходами производства биогаза, через 30 дней после инкубирования (П – необработанная почва; 14-е и 21-е сутки – длительность процесса сбраживания)

с необработанной почвой. Наибольший эффект наблюдается при внесении продуктов брожения смесей, состоящих из ОСВ и лузги подсолнечной и ОСВ и силоса. Время инкубирования бродильных смесей не оказывает влияния на уровень микробной биомассы в почве.

При оценке респираторной активности почвы выявлено, что эффекты продуктов брожения зависят от состава смесей. Так, внесение ОСВ и ОСВ+И ингибирует почвенное дыхание, тогда как смеси, состоящие из ОСВ и лузги подсолнечника либо ОСВ и силоса, приводят к его увеличению в 5.2–5.8 раз. Как и в случае микробной биомассы, длительность инкубирования бродильных смесей не оказывает влияния на уровень респираторной активности.

Поскольку продукты брожения рассматриваются в качестве нетрадиционных удобрений, на следующем этапе было определено их влияние на биомассу и морфометрические показатели овса посевного (*Avena sativa* L.).

Внесение 14-суточных продуктов брожения не оказывает ингибирующего воздействия на биомассу растений; в ряде случаев (ОСВ+И и ОСВ+СИ+И) наблюдается стимулирующий эффект. В то же время эти продукты оказывают ингибирующее воздействие на длину корня (ОСВ+СЕ+И) и высоту наземных побегов овса (ОСВ и ОСВ+СЕ+И). Отходы производства биогаза, отобранные на 21-е сутки брожения, негативно повлияли на уровень биомассы растений в вариантах ОСВ+И и ОСВ+СИЛ+И, длину корней и высоту наземного побега в вариантах ОСВ+СЕ+И и ОСВ+И соответственно (рис. 4).

В целом необходимо отметить, что внесение отходов производства биогаза в почву привело к разнонаправленным воздействиям на растения. Так, при внесении варианта ОСВ+И (14-е сутки) биомасса *Avena sativa* L. оказалась выше, чем в контрольном варианте в 1.4 раза, а ОСВ+И (21-е сутки) – ниже в 1.1 раза. Этот вариант смеси, вне зависимости от времени брожения, не оказывает воздействия

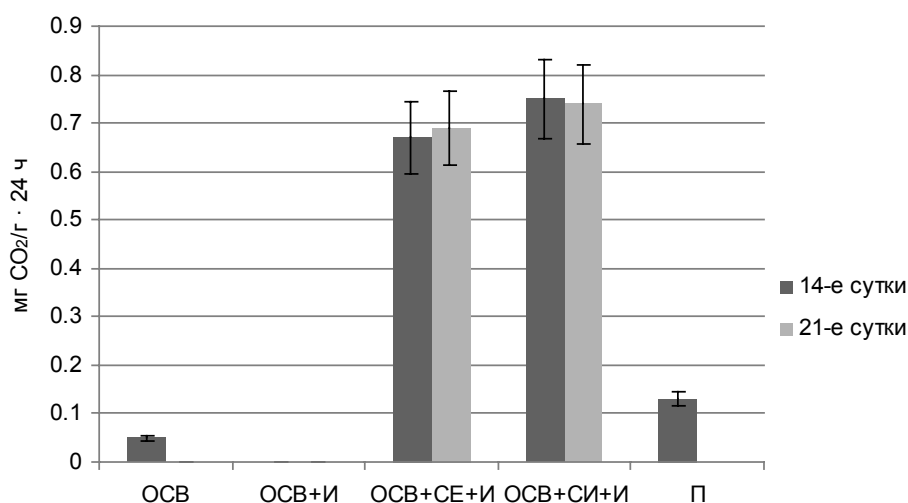


Рис. 3. Респираторная активность почвенных образцов, обработанных отходами производства биогаза, через 30 дней после инкубирования (условные обозначения – как на рис. 2)

на длину корня растений овса, при этом приводит к увеличению длины побега в 1.2 раза при брожении в течение 14 сут и ее уменьшению в 2.3 раза при брожении в течение 21 сут.

Для того чтобы учесть всю совокупность эффектов, оказываемых продуктами сбраживания на почву, нами была проведена их балльная оценка: если продукт брожения вызывал стимулирующий эффект в отношении параметра, присваивался балл «1», ингибирующий – «-1», при отсутствии эффекта – «0». Затем баллы суммировались. Результаты, представленные в табл. 2, показывают, что продолжительность процесса брожения не оказывала существенного влияния на удобрительные свойства продуктов в случае вариантов ОСВ и ОСВ+СЕ+И. В отличие от этих вариантов, продукты сбраживания варианта ОСВ+И оказывали различные эффекты на почву: 14-суточные продукты стимулировали микробиологические параметры и растения, а 21-суточные – оказывали негативное воздействие на указанные показатели. Наибольший итоговый балл получила смесь, состоящая из ОСВ и силоса.

Этот вариант смеси наилучшим образом воздействует на почву как при сбраживании в течение 14 сут, так и при сбраживании в течение 21 сут. Необходимо отметить, что данный вариант оказался наиболее предпочтительным и с точки зрения выхода биогаза.

Таким образом, в работе продемонстрирована принципиальная возможность анаэробной переработки отходов различных производств, причем наиболее эффективным является сбраживание смесей из них. На основании определения выхода биогаза и качества продуктов брожения определена оптимальная продолжительность процесса сбраживания – 14 сут. Сокращение времени процесса до 14 сут обеспечит снижение энергетических затрат и позволит увеличить эффективность использования оборудования.

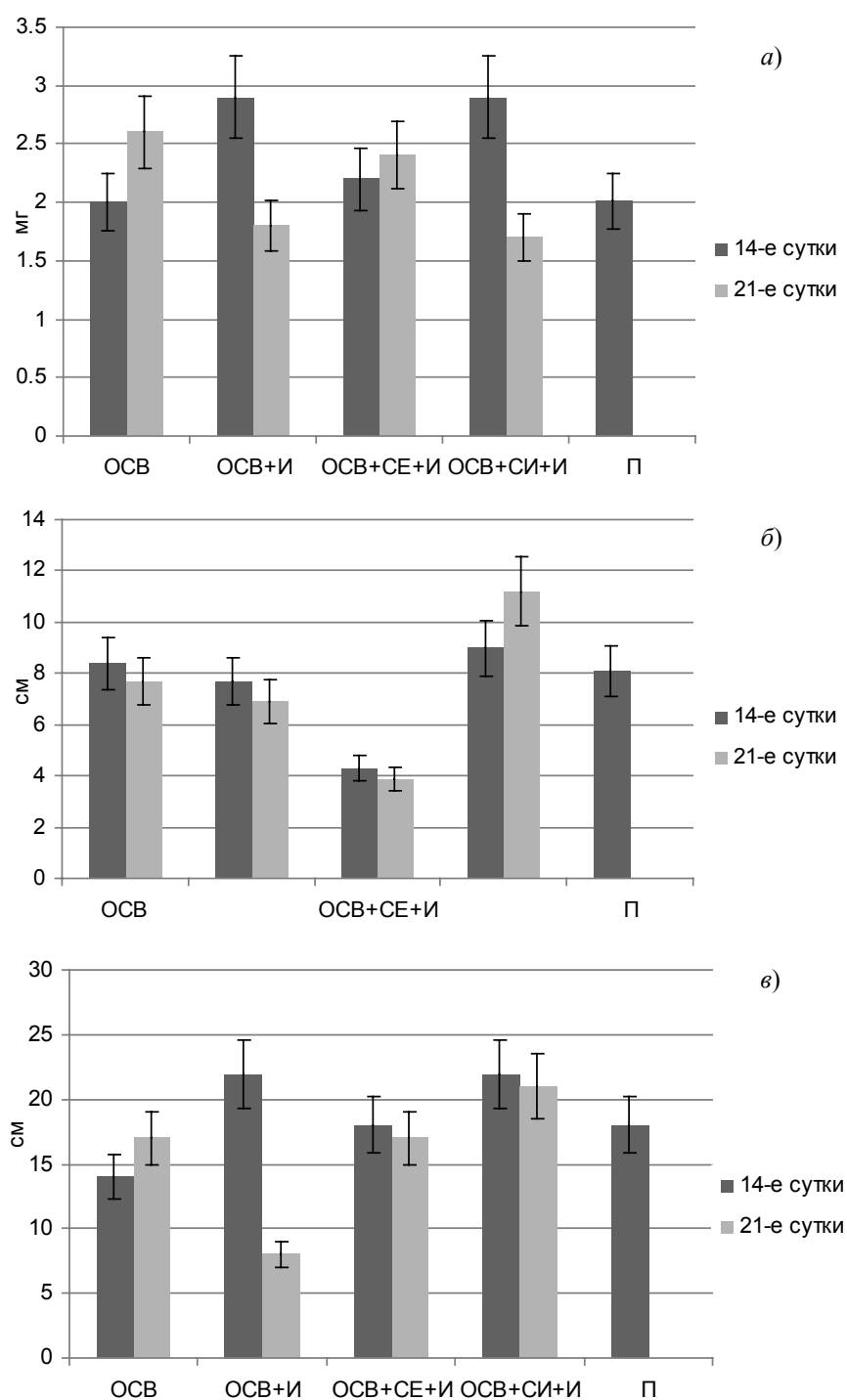


Рис. 4. Влияние почв, обработанных продуктами брожения, отобранными на 14-е и 21-е сутки, на биомассу (а) и морфометрические показатели *Avena sativa* L. (б – длина корня; в – длина наземного побега)

Summary

P.Yu. Galitskaya, P.A. Zvereva, S.Yu. Selivanovskaya. Co-Digestion of Different Industrial Wastes with the Production of Useful Products and Biogas.

The article investigates how the composition of phytogenic wastes and sewage sludge, their inoculation by methanogenic microbial community, and the process duration influence biogas yield during anaerobic thermophilic digestion. The effects of the digestion products implemented for soil treatment on the microbial community parameters and on the biometrics of *Avena sativa* L. is determined. The principal possibility of co-digestion of different wastes is demonstrated. The mixture of sewage sludge and silage is considered to be the most preferable in terms of biogas yield. The digestion products of this mixture possess fertilizing properties.

Key words: anaerobic digestion, organic wastes, biogas, non-conventional fertilizers.

Литература

1. *Bouallagui H., Touhami Y., Cheikh R.B., Hamdi M.* Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes // *Process Biochem.* – 2005. – V. 40. – P. 989–995.
2. *Селивановская С.Ю.* Отходы производства и потребления: правовое регулирование, утилизация, размещение. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2009. – 222 с.
3. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2008 году. – Казань: Идел-Пресс, 2009. – 476 с.
4. *Hartmann H., Ahring B.K.* Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: influence of co-digestion with manure // *Water. Res.* – 2005. – V. 39. – P. 1543–1552.
5. *Mata-Alvarez J.* Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes // *Water Intelligence.* – IWA Publ., 2003. – URL: http://www.iwapublishing.com/pdf/contents/isbn1900222140_contents.pdf, свободный.
6. *Sahlstrom L.* A review of survival of pathogenic bacteria in organic waste used in biogas plants // *Biores. Technol.* – 2003. – V. 87. – P. 161–166.
7. *Kunte D.P., Yeole T.Y., Ranade D.R.* Two-stage anaerobic digestion in developing countries – a review // *Water Sci. Technol.* – 2004. – V. 50. – P. 103–108.
8. *Tafdrup S.* Viable energy production and waste recycling from anaerobic digestion of manure and other biomass materials // *Biomass Bioener.* – 1995. – V. 9. – P. 303–314.
9. *Demirer G.N., Chen S.* Two-phase anaerobic digestion of unscreened dairy manure // *Process Biochem.* – 2005. – V. 40. – P. 3542–3549.
10. *Ward A.J., Hobbs P.J., Holliman P.J., Jones D.L.* Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources // *Biores. Technol.* – 2008. – V. 99. – P. 7928–7940.
11. *Angelidaki I., Ellegaard L.* Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants – status and future trends // *Appl. Biochem. Biotechnol.* – 2003. – V. 109. – P. 95–105.
12. *Bolzonella D., Battistoni P., Susini C., Cecchi F.* Anaerobic codigestion of waste activated sludge and OFMSW: the experiences of Viareggio and Treviso plants (Italy) // *Water Sci. Technol.* – 2006. – V. 53. – P. 203–211.
13. *Romano R.T., Zhang R.H.* Co-digestion of onion juice and wastewater sludge using an anaerobic mixed biofilm reactor // *Biores. Technol.* – 2008. – V. 99. – P. 631–637.
14. *Selivanovskaya S.Yu., Latypova V.Z.* Effects of composted sewage sludge on microbial biomass, activity and pine seedlings in nursery forest // *Waste Manag.* – 2006. – V. 26. – P. 1253–1258.

15. ISO 14240-1. Soil quality – Determination of soil microbial biomass. Part 1: Respiration method. – Geneve, Switzerland, 1994. – 6 p.
16. ISO 14240-2. Soil quality – Determination of soil microbial biomass. Part 2: Fumigation-extraction method. International standard. – Geneve, Switzerland, 1997. – 12 p.
17. ISO 11269-1 Soil quality – Determination of the effects of pollutants on soil flora. Part 1: Method for measurement of inhibition of root growth. – Geneve, Switzerland, 1993. – 9 p.
18. *Luostarinen S., Luste S., Sillanpaa M.* Increased biogas production at wastewater treatment plants through co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge from a meat processing plant // *Biores. Technol.* – 2009. – V. 100. – P. 79–85.
19. *Tait St., Tamis J., Edgerton B., Batstone D. J.* Anaerobic digestion of spent bedding from deep litter piggery housing // *Biores. Technol.* – 2009. – V. 100. – P. 2210–2218.
20. *Singh S.P., Pandey P.* Review of recent advances in anaerobic packed-bed biogas reactors // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2009. – V. 13. – P. 1569–1575.
21. *Jingura R.M., Matengaifa R.* Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development in Zimbabwe // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2009. – V. 13. – P. 1116–1120.
22. Эколог-профессионал. Состав отходов. – 2009 – URL: <http://www.eco-profi.info/othod/1210020008995.htm>, свободный.
23. *Chander K., Dyckmans J., Joergensen R., Meyer B., Raubuch M.* Different sources of heavy metals and their long-term effects on microbial properties // *Biol. Fertil. Soils.* – 2001. – V. 34. – P. 241–247.
24. *Ros M., Herbabdez M.T., Garsia C.* Soil microbial activity after restoration of a semiarid soil by organic amendements // *Soil Biol. Biochem.* – 2003. – V. 35. – P. 463–469.
25. *Sanchez-Monedero M.A., Mondini C., de Nobili M., Leita L., Roig A.* Land application of biosolids. Soil response to different stabilization degree of the treated organic matter // *Waste Manag.* – 2004. – V. 24. – P. 325–332.
26. *Suhadolc M., Schroll R., Gatteringer A., Schlöter M., Munch J.C., Lestan D.* Effects of modified Pb-, Zn-, and Cd-availability on the microbial communities and on the degradation of isoproturo in a heavy metal contaminated soil // *Soil Biol. Biochem.* – 2004. – V. 36. – P. 1943–1954.
27. *Ананьева Н.Д., Демкина Т.С., Стин У.Ч.* Устойчивость микробных сообществ почв при внесении пестицидов // *Почвоведение.* – 1997. – № 1. – С. 69–74.

Поступила в редакцию
15.07.10

Галицкая Полина Юрьевна – кандидат биологических наук, ассистент кафедры ландшафтной экологии Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: gpolina33@yandex.ru

Зверева Полина Александровна – аспирант кафедры прикладной экологии Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: polinazwerewa@rambler.ru

Селивановская Светлана Юрьевна – доктор биологических наук, профессор кафедры прикладной экологии Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: svetlana.selivanovskaya@ksu.ru