

КОМПОСТИРОВАНИЕ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД И ОРГАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Н. Ф. Терлецкая¹, А. С. Антониук¹, А. Н. Гапонюк¹, А. И. Чухольский²

¹Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси, Брест, Беларусь;
²Институт жилищно-коммунального хозяйства НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье представлены результаты изучения параметров процесса компостирования ОСВ с ОТКО (температуры, влажности, плотности, соотношения углерода и азота, содержания органического вещества, кислотности, общего азота, общего фосфора и общего калия) и состава полученного компоста.

Показатели температуры и влажности в бурте из ОСВ и ОТКО соответствовали оптимальным условиям для жизнедеятельности аэробных микроорганизмов, принимающих участие в компостировании.

В процессе созревания компоста отмечалось увеличение плотности компостируемой смеси и уменьшение в ней соотношения углерода и азота. Также в процессе биологического окисления в компостируемой массе снижалась концентрация органического вещества и увеличивалось содержание питательных элементов.

В результате компостирования ОСВ с ОТКО получен компост, пригодный для использования в качестве органического удобрения под посадки лесохозяйственных культур вдоль дорог, в лесных и декоративных питомниках, цветоводстве, озеленении, при рекультивации нарушенных земель.

Ключевые слова: компостирование; осадки сточных вод; органическая часть твердых коммунальных отходов; компост; температура; влажность; соотношение углерода и азота; органическое вещество; кислотность; общий азот; общий фосфор; общий калий.

Для цитирования. Терлецкая Н. Ф., Антониук А. С., Гапонюк А. Н., Чухольский А. И. Компостирование осадков сточных вод и органической части твердых коммунальных отходов // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 100–109.

COMPOSTING OF SEWAGE SLUDGE AND ORGANIC PART OF MUNICIPAL SOLID WASTE

N. F. Tsiarletskaia¹, A. S. Antoniuk¹, A. N. Gaponiuk¹, A. I. Chukhol'ski²

¹The Polesie Agrarian Ecological Institute of the NAS of Belarus, Brest, Belarus;
²Institute of Housing and Communal Services of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The article presents the results of studying the parameters of the process of composting sewage sludge with the OPMW (temperature, humidity, density, carbon to nitrogen ratio, organic matter content, acidity, total nitrogen, total phosphorus and total potassium) and the composition of the resulting compost.

The temperature and humidity indicators in the pile of urban SS and the OPMW corresponded to the optimal conditions for the vital activity of aerobic microorganisms participating in composting.

During the maturation of the compost, an increase in the density of the composted mixture and a decrease in the carbon to nitrogen ratio were observed. Also, during the process of biological oxidation in the composted mass, the concentration of organic matter decreased and the content of nutritional elements increased.

As a result of composting sewage sludge with the OPMW, compost was obtained that is suitable for use as an organic fertilizer for planting forestry crops along roads, in forest and ornamental nurseries, floriculture, landscaping, and in the reclamation of disturbed lands.

Keywords: composting; sewage sludge; organic part of municipal solid waste; compost; temperature; moisture; carbon to nitrogen ratio; organic matter; acidity; total nitrogen; total phosphorus; total potassium.

For citation. Tsiarletskaia N. F., Antoniuk A. S., Gaponiuk A. N., Chukhol'ski A. I. Composting of sewage sludge and organic part of municipal solid waste. *Nature Management*, 2025, no. 1, p. 100–109.

Введение. В настоящее время существует широкий спектр различных технологий переработки осадков сточных вод (ОСВ). Одним из наиболее перспективных методов биологической стабилизации органических отходов является компостирование [1]. В результате данного процесса получают

гумифицированный и обеззараженный сыпучий продукт, который может непосредственно использоваться как органическое удобрение, либо применяться в качестве компонента при производстве почвогрунтов.

Для получения качественных компостов с определенным соотношением углерода и азота, пористой структурой и необходимой влажностью применяют различные наполнители, в частности органическую часть твердых коммунальных отходов (ОТКО). В настоящее время компостирование ОТКО, согласно Национальной стратегии по обращению с твердыми коммунальными отходами и вторичными материальными ресурсами, а также введенному в 2020 г. ТКП 17.11-08-2020 (33040/33140), регламентирующему отдельный сбор и сортировку различных видов отходов, является одной из актуальных задач в сфере обращения с коммунальными отходами в Республике Беларусь.

По литературным данным, совместно с ОСВ компостируют древесные опилки [2–6], древесную щепу [7, 8], древесную кору [9], лиственной опад [10] и солому [11]. Полученные компосты могут быть использованы в сельском и лесном хозяйстве, цветоводстве, при благоустройстве городских территорий, рекультивации нарушенных земель и откосов автомобильных дорог, полигонов твердых коммунальных отходов и др.

Цель работы – изучить параметры процесса компостирования ОСВ и ОТКО, а также состав полученного компоста.

Материалы и методы исследования. Компост был заложен в филиале «Витебскводоканал» УП «Витебскоблводоканал» на открытой площадке для компостирования с асфальтобетонным покрытием. Для закладки компоста использовали следующие компоненты:

– ОСВ с иловых площадок УП «Витебскоблводоканал» после естественного подсушивания. Агрохимический состав ОСВ: содержание органического вещества 59,5 %, общего азота – 3,6, общего фосфора – 2,0, общего калия – 0,4 %, кислотность – 7,7 ед. рН;

– древесные опилки после сортировки и измельчения древесных отходов. Опилки добавляют в компост к ОСВ для оптимизации соотношения углерода к азоту [6], а также в целях выполнения функции регулятора режима влажности органических удобрений [11]. Данные древесные отходы без дополнительных затрат на измельчение имеют небольшой размер частиц, что положительно сказывается на интенсивности разложения древесного материала за счет увеличения удельной площади поверхности. Применение компостов на основе ОСВ и опилок улучшает структуру почвы, снижая ее плотность [12];

– трава и листва после уборки городских территорий. Состав фракций растительных отходов может существенно отличаться, что определяется различными факторами, в частности видом и возрастом растений, средой произрастания. Свежее зеленое сырье содержит большое количество водорастворимых веществ, белков и солей. Сено в среднем содержит 14–17 % воды, 7–10 % протеина, 1,5–3 % жира, 38–42 % безазотистых экстрактивных веществ, 22–28 % клетчатки, 5–8 % золы [13]. Структура и состав листового опада зависят от места и времени сбора, климатических условий. Внешение субстрата из листового опада улучшает структуру почвы, что создает благоприятные условия для развития растений [14].

Сформированный бурт из ОСВ и ОТКО при закладке имел следующие размеры: высоту 2,2 м, ширину 3,7 м, длину 15,0 м.

Анализ проб компостируемой массы по комплексу агрохимических показателей выполняли по стандартным методикам: рН_{KCl} – ГОСТ 27979-88, содержание влаги и сухого остатка – ГОСТ 26713-91, содержание органического вещества и золы – ГОСТ 27980-88, общего азота – ГОСТ 26715-85, общего фосфора – ГОСТ 26717-85, общего калия – ГОСТ 26718-85.

Определение валового содержания тяжелых металлов проводили согласно ГОСТ ISO 22036-2014. Пробоподготовку осуществляли согласно п. 9.7.3 МВИ. МН 3369-2010 «Методика выполнения измерений содержания металлов в жидких и твердых матрицах методом атомной абсорбционной спектроскопии».

Результаты и их обсуждение. Температура в бурте из ОСВ и ОТКО. Температура является одним из основных показателей процесса компостирования [15]. Данный параметр существенно меняется в ходе компостирования за счет теплового эффекта, появляющегося в результате окислительной деструкции ковалентных связей у разлагаемых веществ [16]. Условно принято разделять процесс на четыре температурные стадии: мезофильную (до 40 °С), термофильную (до 60 °С), остывания (до 40 °С) и созревания (до разницы не более 10 °С между средней температурой компостной массы и температурой окружающей среды) [17].

Сразу после закладки компоста начинается мезофильная стадия продолжительностью несколько дней. Численность популяции микроорганизмов быстро увеличивается за счет разложения сначала растворимых и легко деградируемых веществ – простых сахаров и углеводов, затем более сложных – целлюлозы, гемицеллюлозы и белков [18].

Через неделю после закладки температура в бурте составила 49,6 °С, что является индикатором наступления термофильной стадии. В данной фазе происходит ускоренный распад белков, жиров, сложных углеводов [18] и лигнина [16]. Температурный диапазон в термофильной стадии компо-

стирования составил 42,3–58,8 °С, при сильном саморазогреве компоста до температур выше оптимальных для умеренно термофильных микроорганизмов – 64,6 и 65,2 °С. Для отвода тепла проводят аэрацию бурта путем его перемешивания. При ворошении происходит лучшее смешивание наполнителя и ОСВ, биомасса компоста обогащается кислородом, из компоста удаляются продукты метаболизма аэробных микроорганизмов (вода и углекислый газ) [19, 20].

Остывание компоста происходит в результате снижения концентрации легкоразлагаемых веществ, затухания обменных процессов и снижения температуры [15, 18, 21]. В фазу созревания компоста температура в бурте находилась в диапазоне 34,6–15,6 °С и зависела от температуры окружающей среды.

Влажность компостируемой массы. Эффективное компостирование может быть достигнуто за счет обеспечения оптимальных условий для микроорганизмов-деструкторов, использующих воду для транспортировки питательных веществ через клеточную мембрану. Согласно литературным данным, влажность от 45 до 60 % является оптимальной для процесса компостирования [22]. Установлено, что скорость биологических процессов уменьшается на 60 % при снижении влажности с 45 до 35 %, а при влажности 20 % процесс прекращается [23].

При влажности более 70 % в значительной степени тормозится или полностью подавляется активность микроорганизмов. Гравитационная влага, вытесняя воздух, заполняет пустоты между частицами органического вещества, в результате чего из-за дефицита кислорода создаются анаэробные условия, приводящие к снижению температуры компостируемой массы и увеличению сроков компостирования [24].

Влажность компостной массы в период компостирования составляла 47,02–58,76 %. Оптимальную влажность в компосте поддерживали за счет полива бурта по мере необходимости.

Плотность компостируемой массы. Насыпная плотность массы в начале компостирования составила 295,2 кг/м³. По мере минерализации и гумификации компоста данный показатель постепенно увеличивался и в конце процесса компостирования составил 751,4 кг/м³ (рис. 1).

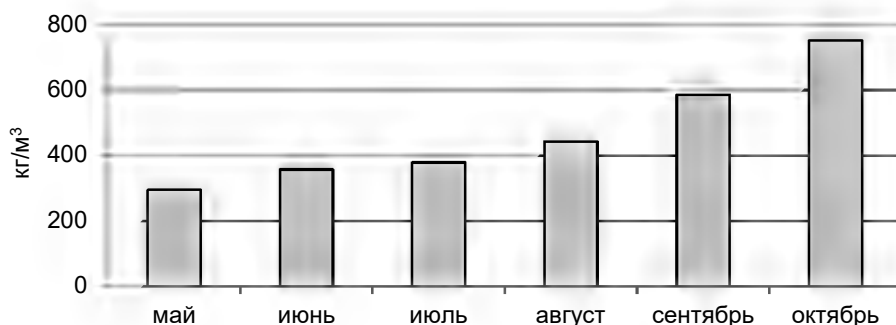


Рис. 1. Изменение плотности компостируемой массы из осадков сточных вод и органической части твердых коммунальных отходов

Fig. 1. Change in the density of compostable mass from wastewater sludge and the organic part of municipal solid waste

Возрастание плотности компоста к концу опыта относительно исходной подтверждается и литературными данными: в процессе компостирования при распаде органического вещества происходит диспергирование материала и его плотность увеличивается [25]. Плотность зрелого компоста оптимального фракционного состава обычно составляет свыше 600 кг/м³ [26].

Соотношение углерода к азоту в компостируемой массе. Одним из важных параметров, влияющих на ход микробиологических процессов при компостировании, является соотношение углерода и азота (C : N) в исходном субстрате [17, 25, 27].

Оптимальным C : N для жизнедеятельности микроорганизмов и, следовательно, эффективного процесса компостирования, является 25 : 1. Если компостируемый субстрат имеет C : N меньше 25, то он разлагается очень быстро, при этом происходит потеря азота в виде аммиака. При распаде субстратов, имеющих соотношение C : N больше 25, трансформация идет медленно, так как процесс лимитируется низким содержанием азота [25].

В связи с этим ОСВ с низким соотношением C : N целесообразно компостировать с ОТКО с высоким содержанием углерода: древесными опилками, стружкой, растительными остатками, листвой и др. Совместное компостирование богатых азотом ОСВ и богатых углеродом лигноцеллюлозных отходов позволяет не только уменьшить запах и стабилизировать органическое вещество ОСВ, но и увеличить концентрацию гуминовых веществ в получаемом удобрении [25].

В процессе компостирования интенсивно разлагаются в первую очередь углеродсодержащие соединения, такие как целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин, смола, воск и жиры, составляющие основную массу древесных остатков. В результате количество углерода снижается быстрее, чем азотистых

соединений, что и приводит к уменьшению соотношения C : N [28–31]. По мнению ряда авторов, характеристикой зрелого компоста является значение C : N равное 8–15 [16, 30, 32].

В ходе компостирования смеси ОСВ с ОТКО соотношение C : N в первые два месяца уменьшилось до 20, еще через такой же период времени – до 14 и в конце компостирования составило 9,1, что является одним из показателей готовности компоста.

Кислотность компостируемой массы. Изменение значений показателя pH компостов является результатом химико-микробиологических преобразований органических соединений и определяется балансом органических кислот, аммиака и углекислоты [33, 34].

Согласно литературным данным, значение pH компостируемой смеси в термофильной стадии становится щелочным за счет выделения аммиака при распаде белков [16, 18, 32]. Аммиак, который образуется при окислении органических веществ, довольно быстро окисляется в азотистую, а затем в азотную кислоту, происходит процесс нитрификации [32, 34] и отмечается снижение щелочности компоста [35].

Полученные нами результаты исследований согласуются с литературными данными: в процессе компостирования отмечалось сначала повышение pH в бурте от 7,4 до 7,6 ед., а затем снижение до 6,9 ед. (рис. 2).

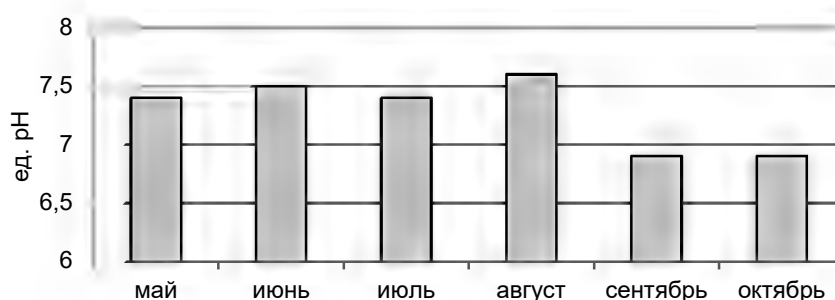


Рис. 2. Кислотность компостируемой массы из осадков сточных вод и органической части твердых коммунальных отходов

Fig. 2. Acidity of composted mass from sewage sludge and the organic part of municipal solid waste

Содержание органического вещества и питательных элементов в компостируемой массе. В ходе биотермического процесса происходит снижение содержания органического вещества в компостируемой массе на 15–30 %, а иногда и 40 %, в зависимости от состава компонентов, продолжительности и условий компостирования [25, 34, 36–38]. В исследованиях П. А. Курынцева [2] максимальное снижение содержания органического вещества в компостах составило 59 % за 90 сут, минимальное – 10 %.

В процессе компостирования ОСВ с ОТКО содержание органического вещества уменьшилось с 45,5 до 31,4 % (рис. 3).

Согласно литературным данным, при компостировании органических отходов в компосте увеличивается доля общего азота [2, 32, 35]. Результаты исследований О. Г. Красноберской соавт. показали [25], что в течение эксперимента содержание общего азота в компосте возросло на 10,0–29,9 % относительно исходного.

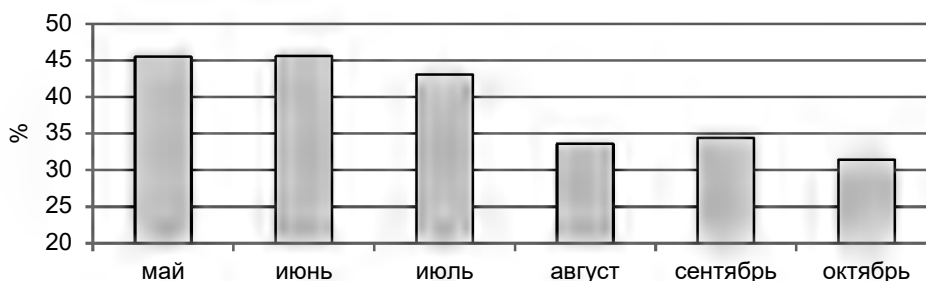


Рис. 3. Содержание органического вещества в компостируемой массе из осадков сточных вод и органической части твердых коммунальных отходов

Fig. 3. Organic matter content in compostable mass from sewage sludge and the organic part of municipal solid waste

В опыте В. В. Миронова с соавт. [32] при компостировании ОСВ наблюдалось увеличение содержания общего азота с 1,5 до 2,3 %, т. е. на 53,3 %.

В результате исследований Д. А. Антоненко [35] установлено, что за три месяца компостирования содержание общего азота в компосте увеличилось на 4–15 %, за пять месяцев – на 15–48 %.

В то же время в работе В. В. Копыткова с соавт. [38] отмечается, что содержание общего азота в субстратах после компостирования в течение месяца уменьшилось в 1,5 раза, в дальнейшем происходило постепенное его накопление до исходного уровня.

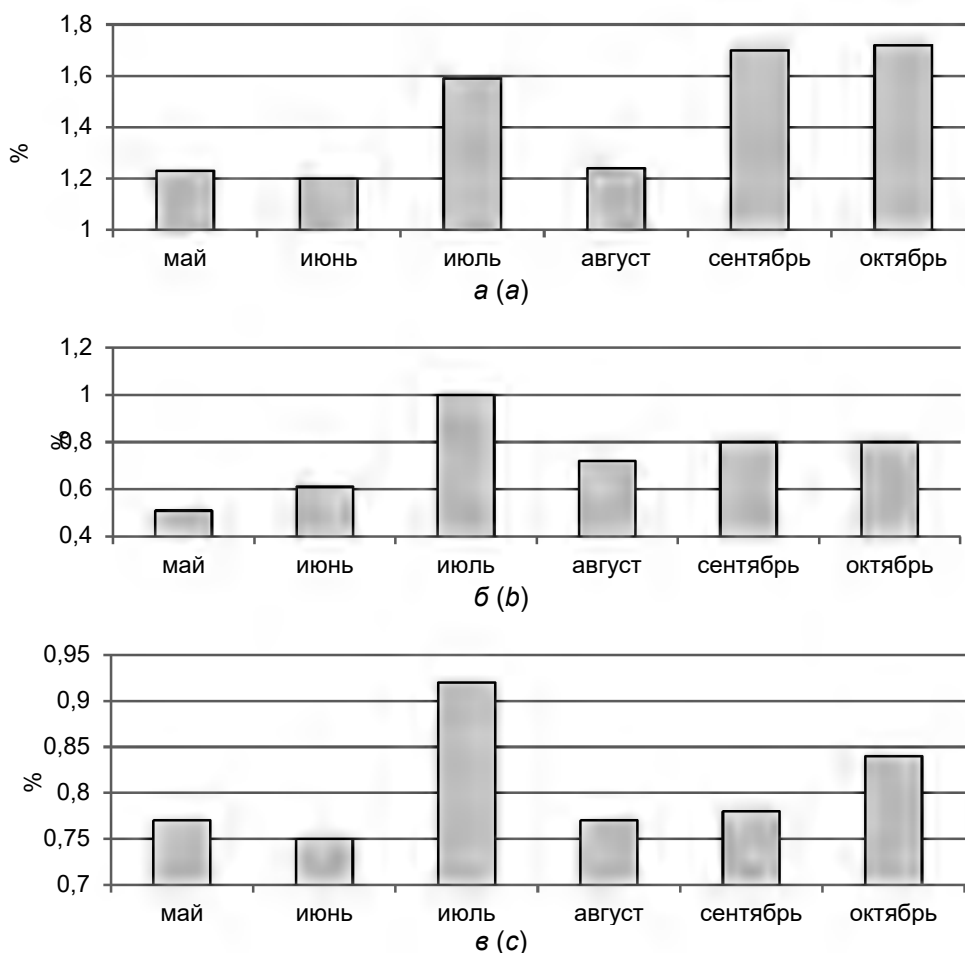


Рис. 4. Содержание общего азота (а), общего фосфора (б) и общего калия (в) в компостируемой массе из осадков сточных вод и органической части твердых коммунальных отходов

Fig. 4. Total nitrogen (a), total phosphorus (b), and total potassium (c) contents in composted mass from sewage sludge and the organic part of municipal solid waste

В результате проведенных нами исследований установлено, что при компостировании ОСВ с ОТКО содержание общего азота увеличилось с 1,23 до 1,72 %, что на 39,8 % больше исходной величины (рис. 4, а).

Согласно литературным данным, содержание общего фосфора при компостировании возрастает на 9,9–22,5 % относительно исходных данных [25]. Результаты исследований И. Н. Барановского и Т. И. Смирновой показали, что за три месяца компостирования содержание общего фосфора в компосте из ОСВ и опилок возросло с 0,82 до 0,91 % [6]. Нами установлено, что в процессе компостирования ОСВ и ОТКО содержание общего фосфора увеличилось с 0,51 до 0,80 % (рис. 4, б).

Содержание общего калия в смеси ОСВ с ОТКО в процессе компостирования варьировало в интервале 0,75–0,92 % (рис. 4, в).

Санитарно-гигиенические показатели компоста из ОСВ и ОТКО. Одним из основных факторов, лимитирующих применение ОСВ и компостов на их основе в качестве удобрений или компонентов плодородного грунта при озеленении, является наличие в них загрязняющих веществ, в том числе тяжелых металлов и патогенных микроорганизмов, в связи с чем при использовании данных отходов, обязательна оценка полученной продукции на соответствие требованиям безопасности.

Токсиколого-гигиенические исследования показали, что полученный компост относится к малоопасным соединениям (четвертый класс опасности). Валовое содержание химических элементов в данном компосте, мг/кг сухого вещества: свинец – 9,24, кадмий – 0,55, цинк – 113,0, медь – 137, никель – 8,04, хром – 35,0, мышьяк – 0,31, ртуть – ниже предела обнаружения (нижняя граница диапазона измерений составляет 0,06 мг/кг). В соответствии с требованиями СТБ 26680-2024 полученный компост может применяться в качестве органического удобрения под посадки лесохозяйственных культур вдоль дорог, в лесных и декоративных питомниках, цветоводстве, озеленении, а также при рекультивации.

Заключение. В результате компостирования ОСВ и ОТКО получен компост, который в соответствии с требованиями СТБ 2668-2024 «Органические удобрения, почвогрунты и субстраты для рекультивации с использованием осадков сточных вод» может применяться в качестве органического удобрения под посадки лесохозяйственных культур вдоль дорог, в лесных и декоративных питомниках, цветоводстве, озеленении, при рекультивации нарушенных земель.

Проведенные исследования продемонстрировали перспективность совместного компостирования ОСВ и ОТКО как эффективного и экологически безопасного метода их переработки, что, с одной стороны, позволяет утилизировать данные отходы, а с другой – получать ценное органическое удобрение.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории биогеохимии, а также лаборатории гидроэкологии и экотехнологий Полесского аграрно-экологического института НАН Беларуси за проведение аналитических исследований по оценке агрохимического состава и содержания химических элементов в компостируемой массе и полученном компосте.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the staff of the laboratory of biogeochemistry, as well as the laboratory of hydroecology and ecotechnology of the Polesie Agrarian Ecological Institute of the NAS of Belarus for conducting analytical studies to assess the agrochemical composition and content of chemical elements in the composted mass and the resulting compost.

Список использованных источников

1. Научно-аналитический обзор использования твердых отходов водоочистных сооружений: мировые тенденции, зарубежный опыт и возможности его применения на территории Российской Федерации / Л. М. Титова, А. Х. Нугманов, М. А. Никулина, М. Ш. Арабов // Вода: химия и экология. – 2019. – № 10–12. – С. 154–161.
2. Курынцева, П. А. Совместная переработка органических промышленных, муниципальных и сельскохозяйственных отходов методами анаэробного сбраживания и компостирования : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.02.08 / Курынцева Полина Алексеевна ; Ин-т экологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального ун-та. – Н. Новгород, 2016. – 25 с.
3. Копылов, К. А. Утилизация органических отходов в зеленом строительстве: экологические, технологические и управленческие аспекты : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук : 03.00.16 / Копылов Константин Александрович; Марийский гос. техн. ун-т. – Йошкар-Ола, 2007. – 23 с.
4. Патент № 2412584 С1 РФ, МПК А01G 1/00. Смесь семян для создания газонов с использованием компостов на основе осадков сточных вод : № 2009124363/21 : заявлено 25.06.2009 : опубл. 27.02.2011 / Романов Е. М., Мухортов Д. И., Средин А. Д. ; заявитель Марийский гос. техн. ун-т. – 7 с.
5. Патент № 2498969 С2 РФ, МПК С05F 15/00. Нетрадиционное органическое удобрение : № 2012105997/13 : заявлено 20.02.2012 : опубл. 20.11.2013 / Бахтина Н. К., Мухортов Д. И., Малюта О. В., Романов Е. М. ; заявитель Марийский гос. техн. ун-т. – 6 с.
6. Патент № 2513558 С1 РФ, МПК С05F 7/00. Способ приготовления компоста из осадка сточных вод (варианты) : № 2013101062/13 : заявлено 09.01.2013 : опубл. 20.04.2014 / Барановский И. Н., Смирнова Т. И. ; заявитель Тверская гос. с.-х академия, ТверьВодоканал. – 9 с.
7. Патент № 2414444 С2 РФ, МПК С05F 7/00, С05F 9/00. Способ совместного компостирования отходов городского хозяйства (варианты) : № 2009118813/21 : заявлено 19.05.2009 : опубл. 20.03.2011 / Луканин А. В., Мартыанов А. А., Тарасова Е. В., Лаврушина Ю. Г., Сахарова А. И. ; заявитель Медбиопром. – 8 с.
8. Гунина, Е. А. Агроэкологическая оценка осадков сточных вод очистных сооружений Южное Бутово г. Москвы для применения в агрикультуре : дис. ... канд. биол. наук : 06.01.04 / Гунина Евгения Александровна ; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – М., 2017. – 142 л.
9. Патент № 2647929 С2 РФ, МПК С05F 11/00, С05F 7/02, С05F 3/00. Способ переработки древесной коры : № 2016126653 : заявлено. 01.07.2016 : опубл. 21.03.2018 / Гаврилов Т. А. ; заявитель Петрозаводский гос. ун-т. – 8 с.
10. Лесина, М. Л. Изучение процессов компостирования отходов при получении биоудобрения / М. Л. Лесина // III Междунар. эколог. форум : сб. материалов, Кемерово, 6–8 окт. 2015 г. / Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева. – Кемерово, 2015. – С. 46–50.

11. Патент № 2514221 С1 РФ, МПК С05F 3/00. Способ получения органоминерального удобрения из осадка сточных вод с помощью компостирования : № 2012137952/13 : заявлено 06.09.2012 : опубл. 27.04.2014 / Каштанов И. А. ; заявители: Каштанов И. А., Бутусов И. В., Бондарь Д. В. – 5 с.
12. Долматов, С. Н. Перспективы применения компоста из древесных опилок / С. Н. Долматов // Аграрный научный журнал. – 2010. – № 3. – С. 49–51.
13. Получение органических удобрений из отходов городских зеленых насаждений / Р. Н. Алиев, З. К. Маймеков, К. Т. Баканов, С. Т. Чериков // Новости науки Казахстана. – 2020. – № 3 (145). – С. 188–206.
14. Патент № 2619979 С РФ, МПК С05F 9/00. Способ приготовления органического удобрения на основе листового опада : № 2015156998 : заявлено 29.12.2015 : опубл. 22.05.2017 / Бекузарова С. А., Цопанова Е. И., Бестаев Г. В. ; заявитель Северо-Осетинский гос. ун-т им. К. Л. Хетагурова. – 5 с.
15. Гаврилов, М. М. Выбор оптимального и актуального для сельского хозяйства метода переработки осадков сточных вод / М. М. Гаврилов, А. А. Пименов, П. Е. Красников // Природообустройство. – 2017. – № 5. – С. 63–69.
16. Фарберова, Е. А. Получение органо-минерального удобрения на основе компоста из растительного сырья / Е. А. Фарберова, А. В. Лапицкая // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2012. – С. 156–168.
17. Состав микробного сообщества на разных стадиях компостирования, перспектива получения компоста из муниципальных органических отходов (обзор) / А. Н. Ножевникова, В. В. Миронов, Е. А. Бочкова [и др.] // Прикладная биохимия и микробиология. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 211–221. – DOI: 10.1134/S0555109919030103.
18. Компостирование осадков сточных вод: теоретические и практические аспекты. Часть 1 / С. Д. Беляева, Е. В. Короткова, М. И. Петров, М. А. Беляев // Экология производства. – 2022. – № 2 (211). – С. 88–90.
19. Аганичева, Е. К. Компостирование осадков городских сточных вод / Е. К. Аганичева, Г. Т. Амбросова // Экология. Риск. Безопасность : материалы Всерос. науч.-практ. конф., Курган, 29–30 окт. 2020 г. / Курганский гос. ун-т. – Курган, 2020. – С. 17–20.
20. К вопросу разработки технологии ускоренного приготовления органических компостов с использованием аэратора-смесителя АСК-4,5 / Т. М. Серая, Е. Н. Богатырева, Л. Я. Степук, А. А. Лях // Земляробства і ахова раслін. – 2012. – № 1. – С. 18–21.
21. Федорова, М. Н. Агроэкологическое обоснование применения компоста на основе осадка сточных вод кожевенного производства при выращивании озимой пшеницы : автореф. дис. ... канд. с.-х наук : 03.00.16 / Федорова Мария Николаевна ; Рязанская гос. с.-х. академия им. проф. П. А. Костычева. – М., 2007. – 25 с.
22. Перспективные источники нетрадиционного органического удобрения – осадки сточных вод / Э. Нағызбекқызы, С. С. Айнур, Г. А. Данлыбаева [и др.] // Астанинский медицинский журнал. – 2021. – № 2 (108). – С. 1–8.
23. Дегтерева, М. С. Методы контроля влажности при биотермическом компостировании органических отходов / М. С. Дегтерева, А. В. Васильев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 4 (5). – С. 970–973.
24. Рожко, А. А. Переработка древесно-растительных остатков компостированием в условиях Подмосковья, влияние компоста на рост сеянцев сосны обыкновенной : автореф. дис. ... канд. с.-х наук : 06.03.01 / Рожко Александр Александрович ; Моск. гос. ун-т леса. – М., 2009. – 23 с.
25. Красноберская, О. Г. Влияние вида целлюлозосодержащего и влагопоглощающего связующего материала на процесс компостирования навозосодержащих смесей / О. Г. Красноберская, Е. Н. Сосновская, Е. С. Стельмах // Природопользование. – 2021. – № 2. – С. 139–145. – DOI: 10.47612/2079-3928-2021-2-139-145.
26. Соломина, О. И. Технология утилизации древесно-растительных отходов городской среды для рекультивации земель : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02 / Соломина Оксана Игоревна ; Моск. гос. ун-т природообустройства. – М., 2004. – 24 с.
27. Седых, А. А. К вопросу соотношения углерода к азоту в компостной смеси при планировании экспериментов / А. А. Седых, В. В. Миронов // Вестник Всероссийского научного-исследовательского института механизации животноводства. – 2016. – № 4 (24). – С. 147–150.
28. Изготовление компоста из растительных отходов / сост.: Е. Л. Имранова, О. А. Кириенко. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2010. – 17 с.
29. Живихина, К. М. Оценка смеси осадков сточных вод с фосфогипсом и опилками / К. М. Живихина // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2013. – Т. 9, № 2. – С. 89–90.
30. Селивановская, С. Ю. Влияние биологических добавок на процесс компостирования органической фракции твердых бытовых отходов и удобрительные свойства компостов / С. Ю. Селивановская, С. А. Ярлыченко, В. З. Латыпова // Агрехимия. – 2007. – № 8. – С. 58–63.
31. Пашкевич, Е. Б. Оценка скорости компостирования опилок бука (*Fagus sylvatica* L.) и сосны (*Pinus sylvestris* L.) с соевой мелассой и влияние их на урожай ячменя (*Hordeum vulgare* L.) / Е. Б. Пашкевич, А. И. Почтенная, М. В. Парахина // Проблемы агрохимии и экологии. – 2021. – № 1. – С. 20–26. – DOI: 10.24412/2227-9407-2024-4-50-61.
32. Динамика биологических процессов при компостировании анаэробно обработанного осадка сточных вод / В. В. Миронов, Е. А. Бочкова, А. В. Ганнесен [и др.] // Микробиология. – 2020. – Т. 89, № 4. – С. 474–487. – DOI: 10.31857/S0026365620040096.
33. Скрыльчик, Е. В. Трансформация органического вещества осадков сточных вод в процессе биоконверсии / Е. В. Скрыльчик, В. А. Гетманенко // Почвоведение и агрохимия. – 2015. – № 1 (54). – С. 172–179.
34. Криволапов, И. П. Анализ биохимических процессов при компостировании / И. П. Криволапов // Вестник МичГАУ. – 2010. – № 1. – С. 65–68.
35. Антоненко, Д. А. Особенности использования растительных остатков для получения компостов / Д. А. Антоненко // Научный журнал КубГАУ. – 2017. – № 134 (10). – С. 1–12.

36. Чекаев, Н. П. Компосты из ОСВ и их влияние на агрофизические свойства чернозема / Н. П. Чекаев, Е. Н. Кузин // Плодородие. – 2007. – № 1. – С. 21–22.
37. Чекаев, Н. П. Изменение свойств чернозема выщелоченного под действием компостов из осадков сточных вод / Н. П. Чекаев // Нива Поволжья. – 2010. – № 1 (14). – С. 31–34.
38. Новые композиционные полимерные составы для лесовыращивания в природно-климатических условиях Беларуси и Казахстана / В. В. Копытков, В. С. Каверин, А. В. Боровков, В. Вл. Копытков. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 510 с.

References

1. Titova L. M., Nugmanov A. H., Nikulina M. A., Arabov M. Sh. *Nauchno-analiticheskiy obzor ispol'zovaniya tverdyh othodov vodoочистnykh sooruzhenij: mirovye tendencii, zarubezhnyj opyt i vozmozhnosti ego primeneniya na territorii Rossijskoj Federacii* [Scientific and analytical review of the use of solid waste from water treatment plants: global trends, foreign experience and the possibilities of its application in the territory of the Russian Federation]. *Voda: himiya i ekologiya = Water: chemistry and ecology*, 2019, no.10–12, pp. 154–161. (in Russian)
2. Kurynceva P. A. *Sovmestnaya pererabotka organicheskikh promyshlennykh, municipal'nykh i sel'skohozyajstvennykh othodov metodami anaerobnogo sbrzhivaniya i kompostirovaniya* [Co-processing of organic industrial, municipal and agricultural waste using anaerobic digestion and composting methods. PhD biol. sci. abstract diss.]. Nizhny Novgorod, 2016, 25 p. (in Russian)
3. Kopylov K. A. *Utilizaciya organicheskikh othodov v zelenom stroitel'stve: ekologicheskie, tekhnologicheskie i upravlencheskie aspekty* [Recycling of organic waste in green construction: environmental, technological and management aspects. PhD agro. sci. abstract diss.]. Joshkar-Ola, 2007, 23 p. (in Russian)
4. Romanov E. M., Mukhortov D. I., Sredin A.D. *Smes' semyan dlya sozdaniya gazonov s ispol'zovaniem kompostov na osnove osadkov stochnykh vod* [Seed mix for creating lawns using composts based on sewage sludge]. Patent RF, no. 2412584, 2011.
5. Bahtina N. K., Mukhortov D. I., Malyuta O. V., Romanov E. M. *Netradicionnoe organicheskoe udobrenie* [Unconventional organic fertilizer]. Patent RF, no. 2498969, 2013. (in Russian)
6. Baranovskij I. N., Smirnova T. I. *Sposob prigotovleniya komposta iz osadka stochnykh vod (varianty)* [Method of preparing compost from sewage sludge (options)]. Patent RF, no. 2513558, 2014. (in Russian)
7. Lukanin A. V., Martianov A. A., Tarasova E. N. V., Lavrushina Yu. G., Sakharova A. I. *Sposob sovmestnogo kompostirovaniya othodov gorodskogo hozyajstva (varianty)* [Method of joint composting of municipal waste (options)]. Patent RF, no. 2414444, 2011.
8. Gunina E. A. *Agroekologicheskaya ocenka osadkov stochnykh vod ochistnykh sooruzhenij Yuzhnoe Butovo g. Moskvy dlya primeneniya v agrikul'ture* [Agroecological assessment of sewage sludge from the treatment facilities of Southern Butovo, Moscow for use in agriculture. Dr. biol. sci. diss.]. Moscow, 2017, 142 p. (in Russian)
9. Gavrilov T. A. *Sposob pererabotki drevesnoj kory* [Method of processing tree bark]. Patent RF, no. 2647929, 2018. (in Russian)
10. Lesina M. L. *Izuchenie processov kompostirovaniya othodov pri poluchenii bioudobreniya* [Study of waste composting processes for obtaining biofertilizer]. *III Mezhdunar. ekolog. forum* [III Int. Environmental Forum]. Kemerovo, 2015, pp. 46–50. (in Russian)
11. Kashtanov I. A. *Sposob polucheniya organomineral'nogo udobreniya iz osadkov stochnykh vod s pomoshch'yu kompostirovaniya* [Method for obtaining organomineral fertilizer from sewage sludge using composting]. Patent RF, no. 2514221, 2014. (in Russian)
12. Dolmatov S. N. *Perspektivy primeneniya komposta iz drevesnykh opilok* [Prospects for using wood sawdust compost]. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal = Agricultural Scientific Journal*, 2010, no 3, pp. 49–51. (in Russian)
13. Aliyev R. N., Maymekov Z. K., Bakanov K.T., Cherikov S. T. *Poluchenie organicheskikh udobrenij iz othodov gorodskih zelenykh nasazhdenij* [Obtaining organic fertilizers from waste from urban green spaces]. *Novosti nauki Kazakhstana = Science news of Kazakhstan*, 2020, no. 3 (145), pp. 188–206. (in Russian)
14. Bekuzarova S. A., Tsopanova E. I., Bestaev G. V. *Sposob prigotovleniya organicheskogo udobreniya na osnove listovogo opada* [Method of preparation of organic fertilizer based on leaf litter]. Patent RF, no. 2619979, 2017. (in Russian)
15. Gavrilov M. M., Pimenov A. A., Krasnikov P. E. *Vybor optimal'nogo i aktual'nogo dlya sel'skogo hozyajstva metoda pererabotki osadkov stochnykh vod* [Selection of an optimal and relevant method for processing sewage sludge for agriculture]. *Prirodoobustrojstvo*, 2017, no. 5, pp. 63–69. (in Russian)
16. Farberova E. A., Lapickaya A. V. *Poluchenie organo-mineral'nogo udobreniya na osnove komposta iz rastitel'nogo syr'ya* [Obtaining organo-mineral fertilizer based on compost from plant materials]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Himicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology*, 2012, pp. 156–168. (in Russian)
17. Nozhevnikova A. N., Mironov V. V., Bochkova E. A., Litt Yu. V., Russkova Yu. I. Composition of microbial community at different stages of composting, perspective of producing compost from municipal organic wastes (review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 211–221. doi:10.1134/S0555109919030103. (in Russian)
18. Belyayeva S. D., Korotkova E. V., Petrov M. I., Belyayev M. A. *Kompostirovanie osadkov stochnykh vod: teoreticheskie i prakticheskie aspekty. Chast' 1* [Composting of sewage sludge: theoretical and practical aspects. Part 1]. *Ekologiya proizvodstva = Ecology of production*, 2022, no. 2 (211), pp. 88–90. (in Russian)

19. Aganicheva E. K., Ambrosova G. T. *Kompostirovanie osadkov gorodskih stochnyh vod* [Composting of municipal sewage sludge]. *Ekologiya. Risk. Bezopasnost' : materialy Vserossijskoj nauch.-pr. konf.* [Ecology. Risk. Safety: materials of the All-Russian scientific-practical conference]. Kurgan, 2020, pp. 17–20. (in Russian)
20. Seraya T. M., Bogatyreva Ye. N., Stepuk L. Ya., Lyakh A. A. *K voprosu razrabotki tekhnologii uskorenogo prigotovleniya organicheskikh kompostov s ispol'zovaniem aeratora-smesitelya ASK-4,5* [On the development of technology for accelerated preparation of organic composts using the ASC-4.5 aerator-mixer]. *Zemlyarobstva i ahova raslin = Agriculture and plant protection*, 2012, no. 1, pp. 18–21. (in Russian)
21. Fedorova M. N. *Agroekologicheskoe obosnovanie primeneniya komposta na osnove osadka stochnyh vod kozhevennogo proizvodstva pri vyrashchivanii ozimoy pshenicy* [Agroecological justification for the use of compost based on tannery wastewater sludge in growing winter wheat. PhD agro. sci. abstract diss.]. Moscow, 2007. 25 p. (in Russian)
22. Nagyzbekkyzy E., Ainur S. S., Danlybaeva G. A., Ayupova A. Zh., Khasenova E. Zh., Sembaeva D. Zh., Moldagulova A. K., Moldagulova N. B. *Perspektivnye istochniki netraditsionnogo organicheskogo udobreniya – osadki stochnyh vod* [Promising sources of non-traditional organic fertilizers – sewage sludge]. *Astaninskij medicinskij zhurnal = Astana Medical Journal*, 2021, no. 2 (108), pp. 1–8. (in Russian)
23. Degtereva M. S., Vasil'ev A. V. *Metody kontrolya vlazhnosti pri biotermicheskom kompostirovanii organicheskikh othodov* [Methods of moisture control in biothermal composting of organic waste]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk = Tidings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 18, no. 4 (5), pp. 970–973. (in Russian)
24. Rozhko A. A. *Pererabotka drevesno-rastitel'nyh ostatkov kompostirovaniem v usloviyah Podmoskov'ya, vliyanie komposta na rost seyancev sosny obyknovnoy* [Processing of wood and plant residues by composting in the conditions of the Moscow region, the effect of compost on the growth of Scots pine seedlings. PhD agro. sci. abstract diss.]. Moscow, 2009. 23 p. (in Russian)
25. Krasnoberskaya O. G., Sosnovskaya E. N., Stel'mah E. S. *Vliyanie vida tsellyulozosoderzhashchego i vlagopogloshchayushchego svyazuyushchego materiala na protsess kompostirovaniya navozosoderzhashchikh smesey* [The impact of a type of cellulose-containing and moisture-absorbing tying material on process of composting of manure-containing mixtures]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2021, no. 2, pp. 139–145. – DOI: 10.47612/2079-3928-2021-2-139-145. (in Russian)
26. Solomina O. I. *Tekhnologiya utilizatsii drevesno-rastitel'nyh othodov gorodskoj sredy dlya rekul'tivatsii zemel'* [Technology of utilization of wood and plant waste of the urban environment for land reclamation. PhD techn. sci. abstract diss.]. Moscow, 2004. 24 p. (in Russian)
27. Sedyh A. A., Mironov V. V. *K voprosu sootnosheniya ugleroda k azotu v kompostnoj smesi pri planirovanii eksperimentov* [On the issue of the carbon to nitrogen ratio in the compost mixture when planning experiments]. *Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva = Bulletin of the All-Russian Research Institute of Livestock Mechanization*, 2016, no. 4 (24), pp. 147–150. (in Russian)
28. Imranova E. L., Kirienko O. A. *Izgotovlenie komposta iz rastitel'nyh othodov* [Making compost from plant waste]. Khabarovsk, Publishing house of Pacific state university, 2010, 17 p. (in Russian)
29. Zhivihina K. M. *Ocenka smesi osadkov stochnyh vod s fosfogipsom i opilkami* [Evaluation of a mixture of sewage sludge with phosphogypsum and sawdust]. *Ekologicheskij Vestnik Severnogo Kavkaza = Ecological Bulletin of the North Caucasus*, 2013, vol. 9, no. 2, pp. 89–90. (in Russian)
30. Selivanovskaya S. Yu., Yarlychenko S. A., Latypova V. Z. *Vliyanie biologicheskikh dobavok na process kompostirovaniya organicheskoy frakcii tverdyh bytovykh othodov i udobritel'nye svoystva kompostov* [The influence of biological additives on the composting process of the organic fraction of solid municipal waste and the fertilizing properties of composts]. *Agrohimiya = Agrochemistry*, 2007, no. 8, pp. 58–63. (in Russian)
31. Pashkevich E. B., Pochtennaya A. I., Parahina M. V. *Otsenka skorosti kompostirovaniya opilok buka (Fagus sylvatica L.) i sosny (Pinus sylvestris L.) s soevoy melassoy i vliyanie ikh na urozhay yachmenya (Hordeum vulgare L.)* [Evaluation of the composting rate of beech (*Fagus sylvatica* L.) and pine (*Pinus sylvestris* L.) sawdust with soybean molasses and their effect on barley (*Hordeum vulgare* L.) yield]. *Problems of agrochemistry and ecology*, 2021, no. 1, pp. 20–26. – DOI: 10.24412/2227-9407-2024-4-50-61. (in Russian)
32. Mironov V. V., Bochkova E. A., Gannesen A. V., Vanteeva A. V., Russkova Yu. I., Nozhevnikova A. N. *Dinamika biologicheskikh processov pri kompostirovanii anaerobno obrabotannogo osadka stochnyh vod* [Dynamics of biological processes during composting of anaerobically treated sewage sludge]. *Microbiology*, 2020, vol. 89, no. 4, pp. 474–487. – DOI: 10.31857/S0026365620040096. (in Russian)
33. Skryl'nik E. V., Getmanenko V. A. *Transformatsiya organicheskogo veshchestva osadkov stochnyh vod v processe biokonversii* [Transformation of organic matter from sewage sludge in the process of bioconversion]. *Pochvovedenie i agrohimiya = Soil science and agrochemistry*, 2015, no. 1 (54), pp. 172–179. (in Russian)
34. Krivolapov I. P. *Analiz biohimicheskikh processov pri kompostirovanii* [Analysis of biochemical processes during composting]. *Vestnik MichGAU = MichGAU Bulletin*, 2010, no.1, pp. 65–68. (in Russian)
35. Antonenko D. A. *Osobennosti ispol'zovaniya rastitel'nyh ostatkov dlya polucheniya kompostov* [Features of using plant residues to obtain composts]. *Nauchnyj zhurnal KubGAU = Scientific Journal of KubSAU*, 2017, no. 134 (10), pp. 1–12. (in Russian)
36. Chekaev N. P., Kuzin E. N. *Komposty iz OSV i ih vliyanie na agrofizicheskie svoystva chernozema* [Composts from sewage sludge and their influence on agrophysical properties of black soil]. *Plodorodie = Fertility*, 2007, no. 1, pp. 21–22. (in Russian)
37. Chekaev N. P. *Izmenenie svoystv chernozema vshchelochennogo pod dejstviem kompostov iz osadkov stochnyh vod* [Changes in the properties of leached chernozem under the influence of composts from sewage sludge]. *Niva Povolzh'ya*, 2010, no. 1 (14), pp. 31–34. (in Russian)

38. Копытков В. В., Каверин В. С., Боровков А. В., Копытков В. В. *Novye kompozicionnye polimernye sostavy dlya lesovyrashchivaniya v prirodno-klimaticheskikh usloviyah Belarusi i Kazahstana* [New composite polymer compositions for forest cultivation in the natural and climatic conditions of Belarus and Kazakhstan]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014, 510 p. (in Russian)

Информация об авторах

Терлецкая Наталья Федоровна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси (ул. Советских Пограничников, 41, 224030, г. Брест, Беларусь). E-mail: klmvntsh@rambler.ru

Антонюк Александра Степановна – научный сотрудник, Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси (ул. Советских Пограничников, 41, 224030, г. Брест, Беларусь). E-mail: ant_sash@rambler.ru

Гапонюк Андрей Николаевич – научный сотрудник, Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси (ул. Советских Пограничников, 41, 224030, г. Брест, Беларусь). E-mail: andnik2017@yandex.ru

Чухольский Антон Игоревич – научный сотрудник, Институт жилищно-коммунального хозяйства НАН Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220084, г. Минск, Беларусь). E-mail: antonchuholskiy@gmail.com

Information about the authors

Natallia F. Tsiarletskaia – Ph. D. (Biology), Senior Researcher, The Polesie Agrarian Ecological Institute of the NAS of Belarus (41, Soviet Border Guards Str., 224030, Brest, Belarus). E-mail: klmvntsh@rambler.ru

Aleksandra S. Antoniuk – Researcher, The Polesie Agrarian Ecological Institute of the NAS of Belarus (41 Soviet Border Guards Str., 224030, Brest, Belarus). E-mail: ant_sash@rambler.ru

Andrey N. Gaponiuk – Researcher, The Polesie Agrarian Ecological Institute of the NAS of Belarus (41 Soviet Border Guards Str., 224030, Brest, Belarus). E-mail: andnik2017@yandex.ru

Anton I. Chukholski – Researcher, Institute of Housing and Communal Services of the NAS of Belarus (10 Academician Kuprevich Street, 220084, Minsk, Belarus). E-mail: antonchuholskiy@gmail.com