

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛЕЗНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛЫ СЖИГАНИЯ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Смирнов Ю. Д., Сучкова М. В.

BENEFICIAL USE OF SEWAGE SLUDGE INCINERATION ASH IN THE NATIONAL ECONOMY

Smirnov Yu. D., Suchkova M. V.

Аннотация

Введение. В статье дана оценка возможности полезного использования золы сжигания осадка городских сточных вод. Необходимость учитывать степень опасности загрязнения золы тяжелыми металлами является важным аспектом при выборе способа ее полезного использования. **Методы.** Проведен анализ содержания тяжелых металлов в золе рентгенофлуоресцентным методом и методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Также выполнен расчет класса опасности отхода, который подтвержден методом биотестирования водной вытяжки. Рассчитаны дозы допустимого внесения отхода в почву с учетом содержания в нем тяжелых металлов. **Результаты.** В ходе лабораторных испытаний установлено, что зола в качестве компонента почвосмеси оказывает положительное влияние на динамику всхожести, рост и развитие растений (на примере *Trifolium pratense*). Полученные данные позволяют говорить о возможности использования отхода в процессе технической рекультивации. Предполагаемый результат разработки — органоминеральная почвосмесь на основе золы сжигания осадка сточных вод, которая может быть задействована также для укрепления и благоустройства дорожных откосов. **Заключение.** Использование предложенных разработок позволит решить вопросы утилизации золы сжигания как отхода. Комплекс применяемых в работе методов исследования может быть успешно использован для оценки степени загрязненности тяжелыми металлами других твердых отходов и почвогрунтов.

Ключевые слова: биотестирование, водоочистка, зола сжигания осадка сточных вод, осадок городских сточных вод, рекультивация, тяжелые металлы.

Abstract

Introduction. The paper provides an assessment of the possibility of using the ash of sewage sludge incineration as a useful component. When choosing a method for its beneficial use, it is important to consider the danger of its contamination with heavy metals. **Methods.** The content of heavy metals in the ash was analyzed using X-ray fluorescence and atomic absorption spectroscopy methods. The waste hazard class was determined and confirmed based on the water extract bioassay method. Doses of allowable waste application to the soil were calculated with account for the content of heavy metals in the ash. **Results.** According to the results of laboratory tests, ash (as a component of soil mixture) has a positive effect on the germination dynamics and plant growth (with *Trifolium pratense* as an example). These data suggest the possibility of using waste in technical reclamation. The estimated result of the development is an organic-mineral soil mixture based on the ash of sewage sludge incineration, which also can be used for strengthening and improvement of road slopes. **Conclusion.** The proposed developments will make it possible to solve issues of incineration ash disposal. The complex of the research methods applied in the course of this study can be successfully used to assess the degree of contamination with heavy metals in other solid wastes and soils.

Keywords: bioassay, water treatment, sewage sludge incineration ash, municipal sewage sludge, reclamation, heavy metals.

Введение

Одной из наиболее актуальных проблем для крупных городов России в целом и для Санкт-Петербурга в частности является вопрос обезвреживания и утилизации постоянно растущего количества образующихся отходов производства и потребления в условиях ограниченной вместимости объектов их размещения. В частности,

деятельность городских канализационных очистных сооружений не сводится лишь к очистке сточных вод; неотъемлемой составляющей также является обращение с осадком (ОСВ). В условиях мегаполиса объем коммунальных сточных вод исчисляется миллионами, а количество осадков — тысячами кубометров в сутки. Снижение объема образования осадков и дальнейшее их

превращение в безвредный продукт — вот основные задачи, поставленные перед современными технологиями.

Отличительная черта ОСВ как отхода — наличие как органической, так и минеральной фаз. Чаще всего ОСВ присваивают **IV класс опасности** в силу повышенного содержания в их составе тяжёлых металлов [1]. По этой причине обычно данный отход размещается на полигонах складирования и не подлежит повторному использованию [17]. При этом существующие направления полезной утилизации отхода зачастую не получают достаточно широкого распространения не только в России, но и за рубежом [18]. Негативное воздействие отхода на окружающую среду складывается из отчуждения земельных площадей под полигоны складирования и сопутствующего загрязнения атмосферы и водных объектов. Таким образом, нельзя не отметить необходимость более тщательного подхода к поиску новых технологий по вовлечению ОСВ в хозяйственный оборот.

Известно, что в 2005 г. в странах Евросоюза 52 % ОСВ были задействованы в сельском хозяйстве, 38 % — сожжены, и 10 % — складированы [19]. Размещение ОСВ на полигонах осуществляется, если их альтернативное использование в качестве вторичных ресурсов невозможно или не оправдано. Однако при этом как осадки, так и почвогрунты на их основе могут быть использованы для проведения биологической рекультивации полигона или создания защитного зеленого барьера [15]. В Северо-Западном регионе Российской Федерации и других областях также нередко применяются технологии компостирования ОСВ, которые варьируются от простого компостирования в открытых валках до более сложных процессов [6].

Одним из наиболее перспективных направлений в утилизации ОСВ является пиролиз (процесс переработки веществ, содержащих углерод, посредством нагрева без доступа кислорода при высоких температурах). Продукты пиролиза могут быть применены в самых различных отраслях промышленности и хозяйства. В частности, порошок, образующийся в результате пиролиза, возможно утилизировать как топливо или применять для получения фосфора и азота [26]. Благодаря наличию высокой концентрации фосфо-

ра и азота ОСВ в принципе являются хорошим удобрением [20]. Так, Нидерланды, Швеция и Испания используют более 60 % осадка для сельскохозяйственных целей; Дания, Англия и Швейцария используют более 45 % для аналогичных целей [25].

Существуют также примеры эффективной мелиорации нарушенных земель с использованием как очищенных сточных вод, так и ОСВ в связи с активным воздействием отхода на процесс почвообразования [24].

Тем не менее ОСВ, используемые в качестве удобрения, могут представлять собой источник загрязнения. До середины 80-х годов колхозы и совхозы активно использовали прошедший обработку осадок в качестве удобрения, но в начале 90-х годов были установлены допустимые нагрузки на почву по тяжелым металлам и обнаружена информация о повышенном содержании тяжелых металлов в осадках городских очистных сооружений, что привело к сложностям с регистрацией данного отхода в качестве удобрения. Вот почему сейчас все большее распространение получают технологии сжигания ОСВ [6].

В частности, ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» уже больше десяти лет успешно использует сжигание ОСВ в печах «кипящего» слоя с целью снижения объемов образования отходов. Однако количество образующейся золы все еще достаточно велико; ее объемы составляют около пятидесяти тысяч тонн в год.

Широкое применение зола находит в рекультивации нарушенных земель, в области сельского хозяйства, в качестве компонента строительных материалов. В частности, известны исследования по таким направлениям, как производство кирпича, керамики, цемента, заполнителей для бетона и так далее [21–23].

Однако существует риск перехода тяжелых металлов, содержащихся в золе, в растворимую форму с дальнейшей миграцией загрязнителей в окружающую среду, если отход окажется под воздействием кислой среды [5]. Так, несмотря на установленный IV класс опасности золы сжигания ОСВ ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», из-за повышенного содержания в отходе тяжелых металлов надзорные органы в настоящее время не рекомендуют его полезное использование.

Работа посвящена решению актуальной **проблемы** утилизации золы сжигания осадка сточных вод городских канализационных очистных сооружений с перспективой использования отхода в народном хозяйстве.

Цель работы — оценка возможности полезного использования золы сжигания осадка сточных вод. **Объектом исследования** является зола сжигания ОСВ Юго-Западных очистных сооружений ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга». **Предмет исследования** — перспективы использования золы в качестве полезного компонента.

Непрерывный рост объемов образования отхода, который сопровождается дефицитом свободных площадей для его складирования, обуславливает как **актуальность исследования**, так и заинтересованность ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» в активном решении вопроса утилизации золы.

Научной новизной работы является установление положительного эффекта, который производит внесение золы сжигания ОСВ в пределах 20 % (по массе) в качестве полезного компонента органоминеральной смеси (из расчета 28,53 т/га в год) на роль и развитие растений (на примере *Trifolium pratense*).

Практическая значимость работы заключается в разработке органоминеральной смеси на основе золы сжигания ОСВ с учетом возможности ее дальнейшего использования для благоустройства городских территорий и при проведении рекультивационных работ.

Основные этапы исследования и ожидаемые результаты:

1. Анализ существующей системы обращения с отходами производства и потребления г. Санкт-Петербурга;

2. Оценка состава и свойств золы сжигания ОСВ ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»;

3. Разработка способа использования золы сжигания ОСВ в качестве полезного компонента в составе почвогрунта с выдачей соответствующих рекомендаций.

Материалы и методы

Работа выполняется с использованием комплекса методов исследований, включающего системный анализ проблемы на основе исследований российских и зарубежных ученых, патентно-информационный анализ, лабораторные ме-

тоды изучения состава и свойств золы сжигания осадка сточных вод. Проект реализован на основе лабораторной и экспериментальной базы ЦКП Санкт-Петербургского горного университета.

Юго-Западные очистные сооружения начали свою работу в 2005 г. как объект филиала «Водоотведение Санкт-Петербурга» ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга». Суточный объем очищаемых городских сточных вод составляет около 330 тыс. м³. Уже в 2007 г. был введен в эксплуатацию завод сжигания осадка, проектная производительность которого составляет 310 м³ обезвоженного осадка (кека) в сутки. Кек представляет собой смесь осадка первичных отстойников и уплотненного ила азротенков. Инсинерация осуществляется в печах псевдооживленного («кипящего») слоя [4].

Оценка состава и свойств золы сжигания ОСВ

Зола сжигания ОСВ внешне представляет собой коричневатый тонкодисперсный порошок. Основной состав отхода представлен SiO₂, фосфатами Fe и Ca, силикатами ряда металлов, причем тяжелые металлы сконцентрированы большей частью в мелкой фракции. Размер частиц составляет 1–50 мкм, насыпная плотность — 0,68 г/см³ (при транспортной влажности).

Чтобы оценить степень загрязненности золы тяжелыми металлами необходимо в первую очередь установить их содержание в пробе и соответствие нормативам качества [13, 14]. Отбор проб выполнен с учетом требований [12]. На основе полученных данных о качественном составе золы (при помощи метода рентгенофлуоресцентного анализа посредством портативного анализатора металлов Niton XLt 898) выбран перечень элементов для последующего проведения количественного анализа Pb, Zn, Mn, Fe, Cu, Mo в соответствии с методикой проведения измерений атомно-абсорбционной спектроскопией [3]. Для выполнения измерений использован спектрометр модели AAC-7000 (Shimadzu, Япония).

Оценка степени загрязнения пробы выполнена путем расчёта коэффициента концентрации К по формуле (1):

$$K = \frac{C}{C_k}, \quad (1)$$

где C — содержание элемента в пробе, мг/кг; C_k — нормативно допустимое значение (ПДК или ОДК) в среде, мг/кг.

Расчитан суммарный показатель загрязнения $Z_{СПЗ}$ по формуле

$$Z_{СПЗ} = \sum K - (n - 1), \quad (2)$$

где n — количество элементов, принимаемых в расчете.

Класс опасности отхода определяется при помощи ПО «Расчет класса опасности отходов 2.0» (с) ИНТЕГРАЛ 2001–2003 в соответствии с [7] и подтверждается результатами биотестирования водной вытяжки отхода (с использованием культуры водоросли хлорелла по соответствующей методике [7, 11]).

Оценка возможности использования золы сжигания ОСВ в качестве полезного компонента

В соответствии с [16] выполнен расчет допустимых доз внесения тяжелых металлов в почву Ленинградской области с учетом их содержания в отходе.

Доза допустимого поступления в почву тяжелого металла рассчитывается по формуле (3), г/га:

$$D_{\text{доп}} = (0,8 \cdot \text{ПДК (ОДК)} - \Phi) \cdot M, \quad (3)$$

где 0,8 — поправочный коэффициент, снижающий нормативное поступление тяжелых металлов в почву на 20 %; Φ — содержание металла в почве до внесения отхода, г/т; ПДК (ОДК) — предельно-допустимая (ориентировочно допустимая) концентрация металла в почве согласно [13] или [14], г/т; M — масса пахотного горизонта почвы в пересчете на сухое вещество, т/га ($M = 3000$ т/га).

Средняя ежегодная доза внесения отхода в почву в пересчете на сухое вещество в течение 10 лет, т/га, определялась по формуле

$$D_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{доп}}}{T \cdot C_{\text{ОСВ}}}, \quad (4)$$

где T — максимальный общий срок внесения отхода на один и тот же участок, годы; $C_{\text{ОСВ}}$ — концентрация металла в образце золы сжигания ОСВ, г/т.

Следует учитывать, что при внесении полезного компонента в почву в пахотном горизонте не должно наблюдаться превышения нормативно допустимых значений содержания тяжелых металлов:

$$\Phi + D \leq \text{ПДК (ОДК)}, \quad (5)$$

где Φ — содержание тяжелого металла в почве до внесения отхода, мг/кг; D — дополнительное поступление тяжелого металла в пахотный горизонт массой 3000 т/га с отходом.

В качестве растения-аккумулятора тяжелых металлов (для оценки воздействия золы сжигания ОСВ как полезного компонента органоминеральной смеси на рост и развитие растений) на основе литературных данных выбран Клевер луговой (лат. *Trifolium pratense*) семейства *Fabaceae*. Также *Trifolium pratense* является сидератом, т. е. дополнительно способствует обогащению почвы азотистыми соединениями и ее укреплению.

Исходя из установленных допустимых доз внесения отхода в почву, был рассчитан состав модельных образцов (рис. 1). Посев семян *Trifolium pratense* произведен в емкости размером 80×90×90 мм с массой исходной почвы в каждом образце 100 г. При норме высева семян *Trifolium pratense* (в качестве газонной травы) 10 г/м² на каждый модельный образец было высажено по 25 семян. Для поддержания влажности производился регулярный полив три раза в неделю (объем 50 мл). В ходе эксперимента также выполнял-

Таблица 1

Содержание тяжелых металлов в золе сжигания ОСВ

№ п/п	Me	C_i	ПДК _i	ОДК _i	Коэффициент концентрации
1	Zn	1740	—	220	7,9
2	Pb	200	32	—	6,3
3	Cu	492	—	132	3,7
4	Mn	965	1500	—	0,6
5	Mo	16,5	Информационное значение		
6	Fe	270 000			

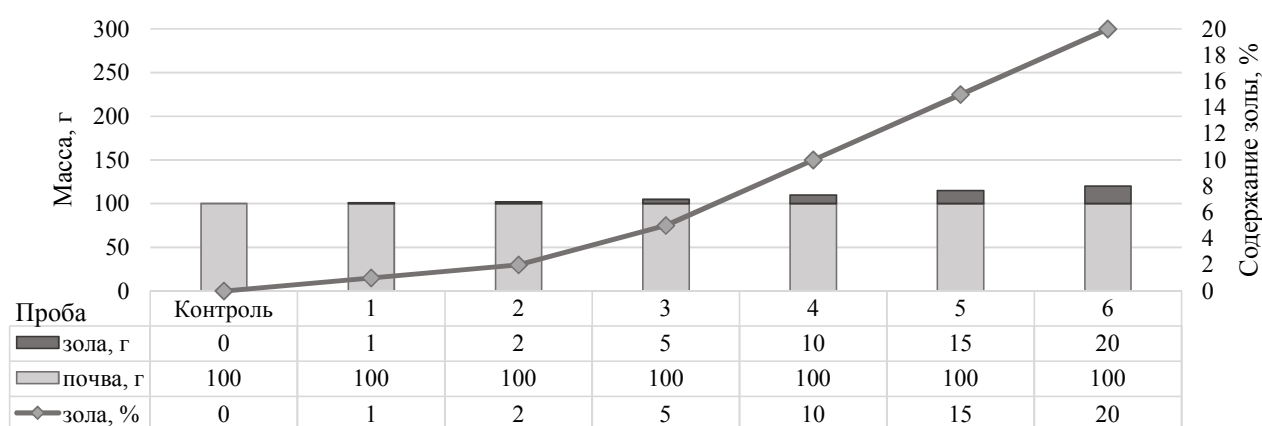


Рис. 1. Состав почвосмеси модельных образцов

ся контроль кислотности почвы в соответствии с методикой [9].

Результаты исследования и обсуждение

Зафиксированы следующие превышения соответствующих нормативов: Zn (7,9 ОДК), Pb (6,3 ПДК), Cu (3,7 ОДК). Результаты представлены в табл. 1.

Суммарный показатель загрязнения равен 15,9 (низкая степень загрязнения) [2].

По итогам исследований было подтверждено отнесение отхода к IV классу опасности при помощи ПО «Расчет класса опасности отходов 2.0» (с) ИНТЕГРАЛ 2001–2003. IV класс опасности отхода также подтвержден по результатам биотестирования водной вытяжки отхода с использованием культуры водоросли хлорелла.

Из полученных расчетных данных (табл. 2) следует, что при внесении золы сжигания ОСВ в почву Ленинградской области из расчета 28,53 т/га в год содержание тяжелых металлов в пахотном горизонте не будет превышать нормативно допустимых значений (где 28,53 т/га — ежегодная доза внесения Zn в почву).

По итогам эксперимента первые всходы семян отмечены на третьи сутки. Всхожесть в образце контроля достигла 88 %, в остальных образцах (кроме образца с дозой золы «20 г») всхожесть превысила контрольную. Наилучшая динамика всхожести наблюдалась у образцов «5 г» и «10 г», при этом следует отметить, что образец «10 г» достиг 100 % всхожести на пятые сутки проращивания, а образец «5 г» — на шестые сутки. Другие модельные образцы 100 %-ной всхожести до завершения эксперимента не достигли (рис. 2).

Исходное значение рН солевой вытяжки контрольного образца (почва Ленинградской области) составило 5,03 ед. рН. При внесении золы в почву отмечен рост рН солевой вытяжки до 2 ед. рН по сравнению с контролем; при этом рост рН напрямую зависит от дозы внесенной золы.

Полученные в ходе эксперимента данные демонстрируют положительный эффект, который оказывает внесение золы сжигания ОСВ ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» в почву Ленин-

Таблица 2

Результаты расчета средней ежегодной дозы внесения исследуемого компонента в почву

Me	Нормативно допустимое значение, мг/кг	Почва, мг/кг	Зола, мг/кг	$D_{\text{дон}}$, г/га	$D_{\text{ср}}$, т/га-год	$\Phi+D$, мг/кг
Mn	1 500	30	965	3 510 000	363,73	52,29
Pb	32	3	200	678 00	33,90	7,62
Cu	132	3	492	307 800	62,56	14,37
Zn	220	10,5	1 740	496 500	28,53	50,69

градской области на рост и развитие *Trifolium pratense*.

Экономический эффект от внедрения результатов теоретических и научно-практических работ на объектах ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» и в крупных мегаполисах определяется с учетом следующих аспектов:

1. Социально-экономический фактор

В соответствии с [10] ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» находится в ведении Комитета по энергетике и инженерному обеспечению. В настоящее время, по данным постановления правительства Санкт-Петербурга от 11.12.2013 № 989 «Об утверждении схемы водоснабжения и водоотведения Санкт-Петербурга на период до 2025 года с учетом перспективы до 2030 года (с изменениями на 25 сентября 2015 года)», в результате деятельности трех заводов сжигания ОСВ в Санкт-Петербурге образуется около 50 тысяч тонн золы в год, которые в полном объеме вывозятся на полигоны складирования. В ведении ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» находятся полигоны «Волхонка-2» (закрыт для ввоза отходов) и «Северный».

Полигон «Северный» (занимает более 80 га в Выборгском районе) введен в эксплуатацию в 1986 году совместно с Северной станцией аэрации согласно [8].

Чрезвычайно актуальной экологической проблемой для Санкт-Петербурга является наличие полигонов складирования ОСВ в непосредственной близости от жилых кварталов. В настоящее время полигон «Северный» заполнен более чем

на 91 % от проектной мощности. Прекращение вывоза золы на полигон с перспективой утилизации уже размещенного отхода не только предоставит возможность освободить часть площадей объекта, но и снизить негативное воздействие на окружающую среду в будущем.

2. Экономическая эффективность

В качестве результата разработки предлагается органоминеральная почвосмесь на основе золы сжигания ОСВ. Продукт наиболее перспективен для использования в качестве удобрения второй группы как предприятиями жилищно-коммунального хозяйства (например, Комитет по благоустройству Санкт-Петербурга), так и частными предприятиями, которым необходимо проведение рекультивации нарушенных земель (например, для полигонов складирования отходов).

Так, в качестве примера можно взять данные Адресной программы ремонта дорог на 2018 год за счет средств бюджета Санкт-Петербурга на 2018–2020 годы (по целевой статье «Расходы на ремонт автомобильных дорог»). Из документа следует, что в указанный период намечено проведение дорожно-строительных работ, требующих озеленительного благоустройства, на общей площади 237,75 га. Учитывая, что среднегодовая допустимая доза внесения золы на благоустраиваемую территорию составит 28,53 т/га, общий объем отхода, требуемого для проведения благоустройства указанной площади, составит 6783 т. При этом только на Юго-Западных очистных сооружениях образуется около 20 м³ золы в сутки или около 4964 т/год.

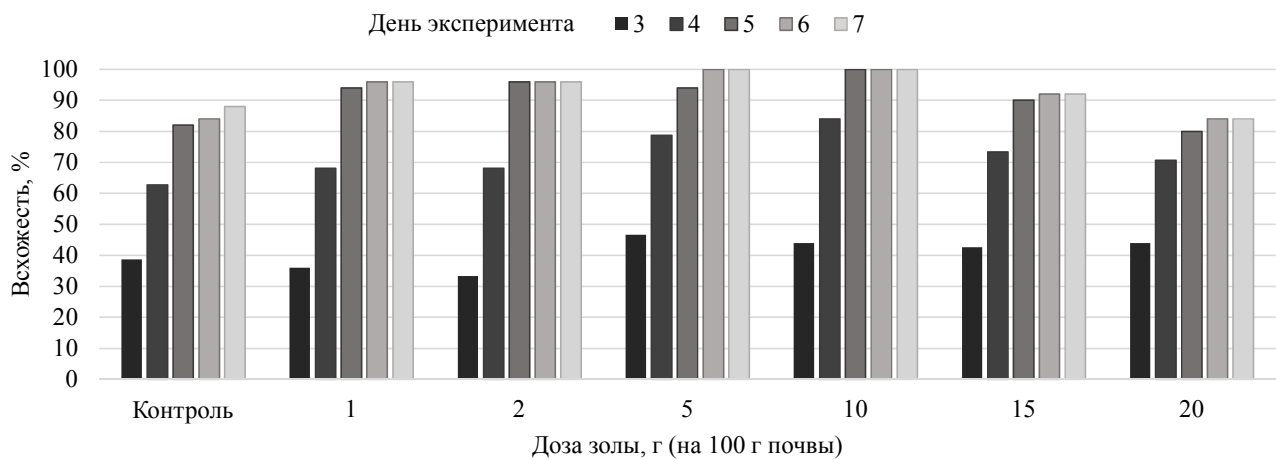


Рис. 2. Динамика всхожести *Trifolium pratense*

Выводы

Для выбора рациональной технологии полезного использования отхода необходимо изучение его состава и свойств. На основе выполненной в ходе научно-исследовательской работы оценки возможности полезного использования золы сжигания осадка сточных вод предлагается следующий комплекс методов исследования твердых отходов, включающий:

1. Определение элементарного состава отхода с использованием методов рентгенофлуоресцентного анализа (посредством портативного анализатора металлов Niton XLt 898) и атомно-абсорбционной спектроскопии (с использованием спектрометра модели AAC-7000, Shimadzu, Япония). Знание элементарного состава позволит рассчитать класс опасности и оценить степень загрязнения отхода тяжелыми металлами.

2. Установление класса опасности, включающее расчет класса опасности отхода в соответствии с Приказом от 4 декабря 2014 года № 536 «Об утверждении Критериев отнесения отходов к I–V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду» и подтверждение класса опасности согласно ПНД Ф Т 14.1:2:4.10–04 «Токсикологические методы контроля. Методика измерений оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления».

3. Определение pH солевой вытяжки отхода. Значения водородного показателя необходимо принимать во внимание, в частности, при подборе состава почвенной смеси с использованием отхода. Выполняется в соответствии с ГОСТ 26483–85 «Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО».

4. Если отход относится к I–III классам опасности (от чрезвычайно опасных веществ до умеренно опасных веществ), он не может использоваться в целях рекультивации и/или благоустройства и направляется на хранение в отвалы. Если отход соответствует IV–V классу опасности (малоопасный или практически неопасный), с учетом содержания в нем загрязняющих веществ, он может быть использован для рекуль-

тивации, благоустройства городских территорий или в качестве компонента удобрения. Эффективность предлагаемого состава может быть доказана лабораторными испытаниями по данным о росте и развитии растений.

Заключительным этапом является оценка целесообразности и эффективности различных способов полезного использования отхода с учетом полученных данных о его составе и свойствах с выдачей соответствующих рекомендаций.

Для городской среды использование предложенных разработок позволит решить вопросы утилизации золы сжигания осадка сточных вод как одной из категории отходов производства и потребления, в настоящее время требующих значительных ресурсов и площадей для их размещения на полигонах складирования. Также применение предложенных технологий утилизации золы позволит использовать полученную продукцию при благоустройстве городских территорий с положительным экономическим эффектом. Следует отметить, что использование исследуемого отхода в качестве полезного компонента органоминеральной смеси способствует повышению плодородных свойств почвы, что подтверждается положительным воздействием на рост и развитие растений (на примере *Trifolium pratense*).

В перспективе использование продукции обладает как значительным ресурсосберегающим эффектом — за счет снижения объемов исходного грунта, требующегося для процессов рекультивации, и утилизации отхода, так и эффектом экономическим, поскольку стоимость почвосмеси с использованием отхода значительно ниже рыночной стоимости грунта.

Дальнейшие исследования предполагается направить на разработку методологического подхода к выбору рационального состава органоминеральной почвосмеси на основе золы сжигания осадка сточных вод и на оценку эффективности ее использования при проведении рекультивационных работ в полевых условиях, учитывая установленный положительный эффект, оказываемый данным компонентом на рост и развитие растений. По результатам исследования авторы планируют подать соответствующую заявку для получения патента на изобретение.

Вопросы очистки золы сжигания ОСВ от тяжелых металлов и поиск способа ее полезного использования входят в перечень приоритетных научных тем Комитета по энергетике и инженерному обеспечению Санкт-Петербурга.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Центра коллективного пользования высокотехнологичным оборудованием Санкт-Петербургского горного университета и Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга.

Литература

1. Баркан, М. Ш., Кузнецов, В. С. и Федосеев, И. В. (2007). Исследование физико-химических параметров осадков городских сточных вод. Записки Горного института, т. 172, сс. 214–216.
2. Главный государственный санитарный врач РФ (1999). МУ 2.1.7.730–99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 17 с.
3. Информационная система «МЕГАНОРМ» (2008). М-МВИ-80–2008. Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии. [online] Доступно по ссылке: <http://meganorm.ru/Index2/1/4293824/4293824289.htm> [Дата обращения: 27.05.2019].
4. Кармазинов, Ф. В., Васильев, Б. В. и Григорьева, Ж. Л. (2008). Сжигание осадков сточных вод – решение проблемы их утилизации. Водоснабжение и санитарная техника, № 9, сс. 19–24.
5. Корельский, Д. С. и Чукаева, М. А. (2013). Оценка состояния почвенно-растительных комплексов, испытывающих стресс при атмотехногенной нагрузке. Записки Горного института, Т. 203, сс. 174–177.
6. Люфт, Я.-Э. и др. (2012). Обработка осадка сточных вод: полезный опыт и практические советы. Турку: Проект по городскому сокращению эвтрофикации, 125 с.
7. Министерство природных ресурсов и экологии РФ (2014). Приказ № 536 «Об утверждении Критериев отнесения отходов к I–V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду» от 4 декабря 2014 года [online]. Доступно по ссылке: <http://docs.cntd.ru/document/420240163> [Дата обращения: 27.05.2019].
8. Министерство регионального развития РФ (2012). СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. М.: Минрегион России, 85 с.
9. Министерство сельского хозяйства СССР (1985). ГОСТ 26483–85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. М.: Издательство стандартов, 6 с.
10. Правительство Санкт-Петербурга (2019). Постановление от 18 мая 2004 г. № 757 «О Комитете по энергетике и инженерному обеспечению» (с изменениями на 25.04.2019) [online]. Доступно по ссылке: <http://docs.cntd.ru/document/8396157> [Дата обращения: 27.05.2019].
11. ФБУ «Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия» (2004). ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10–2004. Токсикологические методы анализа. Методика определения токсичности питьевых, природных и сточных вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов производства и потребления по изменению оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris Beijer*). М.: Федеральная служба по надзору в сфере природопользования, 42 с.
12. ФГУ «Центр экологического контроля и анализа» (2003). ПНД Ф 12.1:2:2.2:3:3.2–03. Отбор проб почв, грунтов, осадков биологических очистных сооружений, шламов промышленных сточных вод, донных отложений искусственно созданных водоемов, прудов-накопителей и гидротехнических сооружений. Методические рекомендации. М.: Министерство природных ресурсов РФ, 12 с.
13. Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (2006). ГН 2.1.7.2041–06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Москва: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 15 с.
14. Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (2009). ГН 2.1.7.2511–09. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 10 с.
15. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (2011). ГОСТ Р 54535–2011. Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при размещении и использовании на полигонах. М.: Стандартинформ, 6 с.
16. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (2012). ГОСТ Р 54651–2011. Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия. М.: Стандартинформ, 14 с.
17. Antonova, I. A., Gryaznov, O. N., Guman, O. M., Makarov, A. V. and Kolosnitsina, O. V. (2014). Geological conditions for allocation of solid municipal and industrial waste disposal sites in the Middle Urals. *Water Resources*, Vol. 41, Issue 7, pp. 896–903. DOI: 10.1134/S0097807814070033.
18. Cieřlik, B.M., Namieřnik, J. and Konieczka, P. (2015). Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 90, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.11.031.
19. Healy, M. G., Clarke, R., Peyton, D., Cummins, E., Moynihan, E. L., Martins, A., Beraud, P. and Fenton, O. (2015). Resource recovery from sewage sludge. In: Konstantinos, K. and Tsagarakis, K. P. (eds.). *Sewage treatment plants: economic evaluation of innovative technologies for energy efficiency*. London: IWA, pp. 139–162.
20. Herzel, H., Krüger, O., Hermann, L. and Adam, C. (2016). Sewage sludge ash — a promising secondary phosphorus source for fertilizer production. *Science of the Total Environment*, Vol. 542, Part B, pp. 1136–1143. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.059.
21. Li, J. and Poon, C. S. (2017). Innovative solidification/stabilization of lead contaminated soil using incineration

sewage sludge ash. *Chemosphere*, Vol. 173, pp. 143–152. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.01.065.

22. Lynn, C. J., Dhir, R. K. Ghataora, G. S. and West, R. P. (2015). Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 98, pp. 767–779. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.122.

23. Smol, M., Kulczycka, J., Henclik, A., Gorazda, K. and Wzorek, Z. (2015). The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 95, pp. 45–54. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.051.

24. Sousa, G., Fangueiro, D., Duarte, E. and Vasconcelos, E. (2011). Reuse of treated wastewater and sewage sludge for fertilization and irrigation. *Water Science & Technology*, No. 64 (4), pp. 871–879. DOI: 10.2166/wst.2011.658.

25. Vigneswaran, S. and Sundaravadivel, M. (2009). Recycle and reuse of domestic wastewater. In: Vigneswaran, S. (ed.). *Wastewater recycle, reuse, and reclamation*, Vol. 1. Oxford: EOLSS Publishers/UNESCO, pp. 48–75.

26. Vodakanazer (2016). Переработка осадков сточных вод и их утилизация. [online] Доступно по ссылке: <http://vodakanazer.ru/kanalizaciya/osadok-stochnyx-vod-eto.html> [Дата обращения: 27.05.2019].

References

1. Barkan, M. Sh., Kuznetsov, V. S. and Fedoseev, I. V. (2007). Research of physical and chemical parameters of deposits of city sewage. *Journal of Mining Institute*, Vol. 172, pp. 214–216.

2. Chief Public Health Officer of the Russian Federation (1999). *Methodological Guidelines MU 2.1.7.730–99. Hygienic evaluation of soil in residential areas*. Moscow: Information and Publishing Center of the Ministry of Health of Russia, 17 p.

3. MEGANORM Information System (2008). M-MVI-80–2008. Methodology for measuring the mass fraction of elements in samples of soils and grounds, bottom sediments using atomic emission and atomic absorption spectrometry. [online] Available at: <http://meganorm.ru/Index2/1/4293824/4293824289.htm> [Date accessed 27.05.2019].

4. Karmazinov, F. V., Vasiliev, B. V. and Grigorieva, Zh. L. (2008). Wastewater sludge incineration is a solution of their utilization problem. *Water Supply and Sanitary Technique*, No. 9, pp. 19–24.

5. Korelskiy, D. S. and Chukaeva, M. A. (2013). Estimation of the condition of the soil-vegetative complexes having stress at atmospheric impact. *Journal of Mining Institute*, Vol. 203, pp. 174–177.

6. Luft, J.-E. et al. (2012). Good practices in sludge management. Turku: Project on Urban Reduction of Eutrophication, 125 p.

7. Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation (2014). Order No. 536 “On approval of criteria for the classification of wastes by I–V hazard classes according to the degree of their negative impact on the environment” dated December 4, 2014. [online] Available at: <http://docs.cntd.ru/document/420240163> [Date accessed: 27.05.2019].

8. Ministry of Regional Development of Russia (2012). SP 32.13330.2012. Sewerage. Pipelines and wastewater

treatment plants. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia, 85 p.

9. Ministry of Agriculture of the USSR (1985). State Standard GOST 26483-85. Soils. Preparation of salt extract and determination of its pH by CINAO method. Moscow: Izdatelstvo Standartov, 6 p.

10. Government of Saint Petersburg (2019). Decree No. 757 dated May 18, 2004 “On the Energy and Engineering Support Committee” (as amended on 25.04.2019). [online] Available at: <http://docs.cntd.ru/document/8396157> [Date accessed: 27.05.2019].

11. Federal State-Financed Institution “Federal Center for Analysis and Evaluation of Anthropogenic Impact” (2004). Environmental Regulatory Document PND F T 14.1:2:3:4.10–2004. Toxicological analysis methods. Methodology for determining the toxicity of drinking, natural and waste water, water extracts from soils, sewage sludge as well as production and consumption wastes by changes in the optical density of the *Chlorella* algae culture (*Chlorella vulgaris Beijer*). Moscow: Federal Service for Supervision of Natural Resources Management, 42 p.

12. Federal State Institution “Center for Environmental Monitoring and Analysis” (2003). Environmental Regulatory Document PND F 12.1:2:2.2:3:3.2–03. Sampling of soils and grounds, sediments of biological treatment plants, sludges of industrial wastewater, bottom sediments of artificial water bodies, storage ponds and hydraulic structures. Methodological guidelines. Moscow: Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, 12 p.

13. Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (2006). Hygienic Standards GN 2.1.7.2041–06. Maximum allowable concentrations (MAC) of chemicals in soil. Moscow: Federal Hygiene and Epidemiology Center of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, 15 p.

14. Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (2009). Hygienic Standards GN 2.1.7.2511–09. Tentative allowable concentrations (TAC) of chemicals in soil. Moscow: Federal Hygiene and Epidemiology Center of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, 10 p.

15. Federal Agency on Technical Regulation and Metrology (2011). State Standard GOST R 54535–2011. Resources saving. Sewage sludge. Requirements for waste dispose and use at landfills. Moscow: Standartinform, 6 p.

16. Federal Agency on Technical Regulation and Metrology (2012). State Standard GOST R 54651–2011. Organic fertilizers on the basis of sewage sludge. Specifications. Moscow: Standartinform, 14 p.

17. Antonova, I. A., Gryaznov, O. N., Guman, O. M., Makarov, A. B. and Kolosnitsina, O. V. (2014). Geological conditions for allocation of solid municipal and industrial waste disposal sites in the Middle Urals. *Water Resources*, Vol. 41, Issue 7, pp. 896–903. DOI: 10.1134/S0097807814070033.

18. Cieřlik, B. M., Namiećnik, J. and Konieczka, P. (2015). Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 90, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.11.031.

19. Healy, M. G., Clarke, R., Peyton, D., Cummins, E., Moynihan, E. L., Martins, A., Béraud, P. and Fenton, O. (2015).

Resource recovery from sewage sludge. In: Konstantinos, K. and Tsagarakis, K. P. (eds.). *Sewage treatment plants: economic evaluation of innovative technologies for energy efficiency*. London: IWA, pp. 139–162.

20. Herzel, H., Krüger, O., Hermann, L. and Adam, C. (2016). Sewage sludge ash — a promising secondary phosphorus source for fertilizer production. *Science of the Total Environment*, Vol. 542, Part B, pp. 1136–1143. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.059.

21. Li, J. and Poon, C. S. (2017). Innovative solidification/stabilization of lead contaminated soil using incineration sewage sludge ash. *Chemosphere*, Vol. 173, pp. 143–152. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.01.065.

22. Lynn, C. J., Dhir, R. K. Ghataora, G. S. and West, R. P. (2015). Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 98, pp. 767–779. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.122.

23. Smol, M., Kulczycka, J., Henclik, A., Gorazda, K. and Wzorek, Z. (2015). The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 95, pp. 45–54. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.051.

24. Sousa, G., Fanguero, D., Duarte, E. and Vasconcelos, E. (2011). Reuse of treated wastewater and sewage sludge for fertilization and irrigation. *Water Science & Technology*, No. 64 (4), pp. 871–879. DOI: 10.2166/wst.2011.658.

25. Vigneswaran, S. and Sundaravadeivel, M. (2009). Recycle and reuse of domestic wastewater. In: Vigneswaran, S. (ed.). *Wastewater recycle, reuse, and reclamation*, Vol. 1. Oxford: EOLSS Publishers/UNESCO, pp. 48–75.

26. Vodakanazer (2016). Recycling of sewage sludge and its disposal [online]. Available at: <http://vodakanazer.ru/kanalizaciya/osadok-stochnyx-vod-eto.html> [Date accessed 27.05.2019].

Авторы

Смирнов Юрий Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: ckr@spmi.ru

Сучкова Марина Вячеславовна

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: cjgreykot@gmail.com

Authors

Smirnov Yuriy Dmitrievich, Ph. D. in Engineering,
Associate Professor
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg
(ex Leningrad), Russian Federation
E-mail: ckr@spmi.ru
Scopus ID: 56096631200

Suchkova Marina Vyacheslavovna

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg,
Russian Federation
E-mail: cjgreykot@gmail.com