

ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОЛЫ ОТ СЖИГАНИЯ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД КАК РЕКУЛЬТИВАЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Л.П. Капелькина

Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Эл. почта: kapelkina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 06.08.2024; принята к печати 18.11.2024

Изучены состав и свойства золы от сжигания осадка сточных вод Северных очистных сооружений Санкт-Петербурга. Определена ее пригодность для биологической рекультивации. Состав золы неоднородный, что обусловлено разнообразием сточных вод, поступающих на очистные сооружения. По гранулометрическому составу зола соответствует пылеватому суглинку или пылеватой супеси (классификация Качинского). Валовой состав золы близок по содержанию основных окислов к зональным почвам. Преобладают окислы кремния, алюминия, железа. В золе очень низкое содержание органического вещества (до 1–3%) и высокое, избыточное для роста растений содержание соединений калия и фосфора. Вследствие высокотемпературной обработки сырого осадка в золе отсутствует основной элемент питания – азот. У водной взвеси золы щелочная реакция. Гидролитическая кислотность золы низкая. Пористость высокая. В золе повышенные концентрации как валовых, так и подвижных форм ряда тяжелых металлов, прежде всего кадмия, относящегося к 1-му классу опасности. Несмотря на большое число исследований по утилизации золы в различных направлениях, ее промышленное использование не налажено. Ежегодное поступление большого количества золы на полигоны и нерешенность проблемы ее утилизации обусловили необходимость изучения ее состава и свойств как рекультивационного материала. Для установления пригодности золы для рекультивации на отсыпанный золой участок осуществлен посев различных видов травянистых многолетних растений. Установлены активное поселение дикорастущих растений с окружающей местности на этот участок и возможность рекультивации золоотвала, имеющей санитарно-гигиеническую направленность.

Ключевые слова: состав и свойства золы, осадок сточных вод, тяжелые металлы, рекультивация.

CHARACTERIZATION OF ASH GENERATED BY SEWAGE SLUDGE INCINERATION AND TESTED AS A SUBSTRATE FOR REVEGETATION

L.P. Kapelkina

Saint-Petersburg Research Center of Environmental Safety, the Russian Academy of Sciences,
Saint Petersburg, Russia

Email: kapelkina@mail.ru

The present communication presents the results of studies of the composition and physical properties of ash generated by incineration of sewage sludge at the Northern Sewage Water Treatment Plant in Saint Petersburg. The suitability of ash for biological reclamation has been determined. The composition of ash is heterogeneous, which is due to the diversity of wastewater entering the treatment facilities. In terms of its granulometric composition, ash corresponds to dusty loam or dusty clay sand according to Kachinskiy classification. The gross composition of ash is close, in terms of the content of prevalent oxides, to the zonal soils. Silica, aluminum and iron oxides prevail. Organic matter content is very low (up to 1-3%), whereas the contents of potassium and phosphorus compounds is excessive for plant vegetation. Because of the high-temperature treatment of raw sediment, there is no nitrogen, which is an essential nutrient for plants. Ash suspension is alkaline. The hydrolytic acidity of ash is low. Ash porosity is high. Elevated in the ash are the contents of some heavy metals and their labile forms. Among them, cadmium is referred to hazard Class 1. Despite numerous studies of the utility of ash for different applications, it is still not used in industry. The large amounts of ash disposed at landfills, the problem of its utilization being still suspended, necessitates further studies of the composition and properties of ash as a possible substrate suitable for reclamation purposes. To this end, ash was applied to a test plot, and several perennial grasses were sowed there. The observation that wild growing plants vigorously penetrate the test plot suggests the possibility of reclamation of ash dumps for sanitary and hygienic purposes.

Keywords: ash composition and properties, sewage sludge, heavy metals, revegetation.

Введение

Качественная очистка сточных вод обуславливает увеличение содержания загрязняющих веществ

в осадке сточных вод (ОСВ). Проблемы утилизации сырого осадка сточных вод рассмотрены во многих работах [3, 4, 18]. Для избавления от большого коли-

чества осадка в Санкт-Петербурге принято решение о его сжигании. Санкт-Петербург является первым и единственным городом России, в котором к настоящему времени практически полностью решена проблема утилизации сырого осадка путем его сжигания в псевдоожиженном слое [10]. Сжигание ОСВ признается перспективным направлением его утилизации [2, 5]. Метод сжигания ОСВ в Петербурге позволил сократить его объем более чем в 10 раз за счет потерь воды, выгорания органических веществ, в том числе токсичных. Тем не менее, общее количество ежегодно образуемой золы составляет около 40–50 тысяч тонн в год, что создает определенные сложности для ее размещения в связи с ограниченностью земель.

Всесторонняя оценка состава и свойств золы является необходимым условием как для выяснения возможности ее утилизации в различных направлениях [16, 23, 31], так и для определения степени ее пригодности для биологической рекультивации, восстановления нарушенных земель. Поиск технологических решений по утилизации золы – определяющий фактор в решении проблемы безотходной и/или малоотходной технологии, путь к снижению объемов и площадей, занятых этим отходом, а рекультивация земель, занятых золой, позволит сократить и вернуть в хозяйственный оборот площади, занятые ею.

В 1970–1980-е годы в Ленинграде рядом научно-исследовательских институтов (ВНИИ торфяной промышленности, Институтом химической мелиорации почв и других) были проведены обширные исследования по изучению возможности использования сырого осадка в качестве удобрений, проведены экспериментальные работы на сельскохозяйственных полях и при озеленении города, разработаны Рекомендации по ее использованию в зеленом строительстве и сельском хозяйстве¹. Но разрешение санитарных органов на использование ОСВ не было получено из-за содержащегося в осадке большого количества тяжелых металлов (ТМ), наличия яиц гельминтов и по другим причинам. Это обусловило поиск других направлений утилизации осадка, и было принято решение по его сжиганию.

Зарубежный опыт показывает весьма разнообразные методы утилизации осадка сточных вод. Так, осадок сточных вод практически полностью сжигается в Нидерландах и в Швейцарии – более 95%, а в Германии и Австрии – более 60%. В Сербии, Боснии, Хорватии, на Мальте осадок практически полностью размещается на полигонах. В Албании, Португалии, Великобритании, Ирландии, Испании свыше 60% осадка используется на сельскохозяйственных полях [13].

¹ Рекомендации по использованию осадков городских сточных вод в зеленом строительстве и сельском хозяйстве. Ленинград: Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-технологический институт химической мелиорации почв; 1987.

В настоящее время проводятся исследования вещественного состава и свойств золы ОСВ в Санкт-Петербурге, Новосибирске, Омске [7, 11, 21] и ее токсичности [6]. В свою очередь проведена апробация технологических решений по использованию золы в дорожном строительстве [9, 14], в производстве золопенобетона [12, 20] и керамических изделий [19, 22, 25], для извлечения фосфора [17, 32] и изучения его удобрительных свойств [24, 26, 29], при реализации технологии 3D-печати [27], а также в составе различных строительных материалов и в других применениях [15, 30, 33]. Однако публикаций по изучению и использованию золы для улучшения свойств почв и для благоустройства и озеленения территорий в качестве рекультивационного материала относительно немного [8, 28]. Несмотря на значительное число проведенных исследований, промышленное использование золы не налажено вследствие нерентабельности предлагаемых технологий и сложности реального их применения. Кроме того, в определенной степени ограничивает область ее применения способность содержащихся в золе ТМ при контакте с водой и изменении реакции среды переходить в подвижную форму. При сжигании осадка процентное содержание ТМ в золе увеличивается за счет выгорания органического вещества. Нерешенность проблемы промышленной утилизации золы и большие объемы ее ежегодного образования обусловили целесообразность изучения золы ОСВ как субстрата для биологической рекультивации и рассмотрение, как возможного варианта, рекультивации полигона на месте размещения золы при заполнении полигона до проектных отметок.

Целью исследования явилось изучение состава и свойств золы как рекультивационного материала. Наряду с изучением свойств золы были проведены экспериментальные работы по санитарно-гигиеническому направлению рекультивации без применения плодородного слоя почвы, то есть при минимуме затрат.

Изучение состава и свойств золы ОСВ как субстрата для биологической рекультивации осуществлялось методами, принятыми в почвоведении [1]. Полевые работы по рекультивации на полигоне золы ОСВ в Санкт-Петербурге проведены впервые.

Методы исследования

Многокомпонентный, неоднородный и непостоянный состав золы ОСВ определяет необходимость учета многих показателей при выборе направлений ее использования. Состав золы зависит от поступающего на очистные сооружения осадка сточных вод. Пробы золы были отобраны на полигоне Северных очистных сооружений. Две пробы золы отобраны согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017 на полевых участках с площадок 10 × 10 м. Каждая проба состояла из 10 точечных проб, которые были объединены и смешаны. Одна проба отобрана на заводе.

Проба № 1 отобрана на полигоне в месте размещения золы. Глубина отбора 0–5 см.

Проба № 2 отобрана непосредственно на заводе по сжиганию ОСВ.

Проба № 3 отобрана на участке заложения полевого опыта с глубины 0–20 см (зона основного размещения корневых систем травянистых растений).

Гранулометрический состав золы определен по ГОСТ 12536-2014. Название грунта дано по Качинскому, как это принято в почвоведении.

Валовой химический состав золы ОСВ определен соответственно «Руководству по химическому анализу почв» [1].

Валовые формы химических элементов определены методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98). Подвижные формы химических элементов определены в ацетатно-аммонийном буферном растворе с pH 4,8 (ПНД Ф 16.1:2.3:3.50-08). Массовая доля водорастворимых форм тяжелых металлов определена по М-МВИ-80-2008. pH водной вытяжки определен по ГОСТ 26423-85. Емкость катионного обмена (ммоль/100 г) – по ГОСТ 17.4.4.01-84. Гидролитическая кислотность (ммоль/100 г) – по Каппену (ГОСТ 26212-2021).

Фосфор и калий (подвижная форма) определены по методу Чирикова (ГОСТ 26204-91) и по методу Мачигина (ГОСТ 26205-91), водорастворимые формы этих элементов определены согласно «Методическим рекомендациям по анализу объектов неизвестного состава (воздух, вода, почва, промышленные продукты и полупродукты, отходы и др.)» методом атомно-эмиссионной спектрометрии с микроволновой плазмой АЭС-МП (ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»; ФР.1.31.2019.34143).

Аналитические работы выполнены в аккредитованной лаборатории Почвенного института им. В.В. Докучаева (г. Москва).

Результаты исследований СВОЙСТВА ЗОЛЫ

Зола по своим физическим свойствам представляет собой однородный по структуре, очень легкий, сыпучий, тонкодисперсный, сильно пылящий материал. Ее насыпная плотность составляет от 0,68 г/см³ [16] до 0,74 г/см³ [11]. Зола, погруженная в воду, меняет цвет на более темный, становится более плотной, тонет в воде, ее плотность становится больше единицы.

По гранулометрическому составу (таблица 1) золу следует классифицировать как пылеватый легкий суглинок или как пылеватую супесь (по классификации Качинского, принятой в почвоведении). Преобладающими в золе являются фракции мелкого песка и крупной пыли. Частицы этих размеров обладают очень малой поглотительной способностью. Зола бесструктурная, представлена элементарными частицами, не находящимися в микроагрегатном состоянии. Присутствие в золе большого количества пылевой фракции обуславливает ее сильное пыление.

Пробы золы были подвергнуты валовому (вещественному) анализу (таблица 2). Содержание окислов в золе сравнивалось с общим содержанием окислов в зональной лесной подзолистой почве Ленинградской области. Результаты проведенных анализов свидетельствуют об определенном сходстве между золой ОСВ и зональными подзолистыми почвами. В анализируемых пробах золы, как и в зональных подзолистых почвах, на первом месте по содержанию находятся окислы кремния, на втором – окислы алюминия. В повышенных количествах в золе содержатся окислы железа и особенно фосфора. Окись серы присутствует в золе в количестве, значительно превышающем ее содержание в природной лесной почве, не подвергнутой техногенному воздействию. Содержание основных элементов питания растений – азота, фосфора, калия (N, P, K) – в золе не сбалансировано: в избыточном

Табл. 1

Гранулометрический состав золы ОСВ, %

Фракции, мм	Наименование пробы				Название фракции
	Зола ОСВ № 1	Зола ОСВ № 2	Зола ОСВ № 3	Почва (горизонты A ₁ -C)	
0,5–0,25	0,50	–	–	–	Песок средний
0,25–0,10	4,80	3,15	2,30	3,40	Песок мелкий
0,10–0,05	27,55	30,02	31,02	27,36	
0,05–0,01	48,05	44,25	42,64	48,16	Пыль крупная
0,01–0,005	6,76	7,12	7,88	7,36	Пыль средняя
0,005–0,001	5,42	7,10	6,82	5,80	Пыль мелкая
< 0,001	6,92	8,36	9,34	7,92	Ил
Σ фракций менее 0,01	19,10	22,58	24,04	21,08	–
Название грунта по гранулометрическому составу	Супесь пылеватая	Суглинок легкий пылеватый	Суглинок легкий пылеватый	Суглинок легкий пылеватый	–

количестве содержатся окислы фосфора, но из-за высокотемпературной обработки в ней практически отсутствует основной элемент питания растений – азот. Содержание остаточного количества органического вещества в золе очень низкое и по результатам проведенных анализов не превышает 2%.

Результаты определения валового содержания ТМ и содержания их подвижных форм в золе приведены в табл. 3. ТМ характеризуются высокой токсичностью, многие из них обладают способностью накапливаться

в тканях живых организмов, что определяет их негативную роль при формировании экологической нагрузки на объекты окружающей среды и население. Подвижные формы способны мигрировать в почву, воду, растениеводческую продукцию. Именно подвижные формы химических элементов обуславливают токсичность или экологическую безопасность среды. Обычно подвижность ТМ в грунтах и почвах оценивают по их способности экстрагироваться различными растворителями. Наиболее часто употре-

Табл. 2

Валовое содержание окислов в золе (% в расчете на прокаленную навеску)

Наименование пробы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃
Зола ОСВ № 1	53,1	12,0	9,02	6,07	1,21	2,63	2,98	0,25	0,14	10,28	1,77
Зола ОСВ № 2	51,1	13,1	9,58	6,20	1,31	2,70	2,70	0,25	0,16	11,05	1,90
Зола ОСВ № 3	50,4	13,4	9,44	5,32	1,51	2,46	2,47	0,26	0,24	11,77	1,98
Зональная почва (горизонты A ₁ -C)	65–75	13–19	4,4–5,8	0,9–1,3	1,2–2,3	1,17–1,42	1,9–3,5	0,3–0,5	0,12–0,21	0,02–0,1	0,02

Табл. 3

Содержание валовых и подвижных форм химических элементов в пробах золы ОСВ, мг/кг

Элемент	Валовое содержание	Подвижные формы	Процент подвижных форм относительно валового содержания
Проба № 1			
Марганец	980 ± 290	96 ± 14	9,8
Железо	50000 ± 13000	12,5 ± 1,9	0,025
Кадмий	28 ± 13	2,4 ± 0,6	8,57
Хром	123 ± 25	0,30 ± 0,09	0,24
Медь	250 ± 50	21 ± 3	8,4
Никель	59 ± 21	0,91 ± 0,27	1,54
Свинец	47 ± 12	1,5 ± 0,4	3,19
Цинк	850 ± 170	37 ± 6	4,35
Кобальт	24 ± 10	0,43 ± 0,13	1,79
Проба № 2			
Марганец	990 ± 300	86 ± 13	8,8
Железо	51000 ± 14000	9,7 ± 2,4	0,019
Кадмий	32 ± 16	2,5 ± 0,6	7,8
Хром	270 ± 50	0,39 ± 0,12	0,14
Медь	330 ± 70	23 ± 3	6,97
Никель	550 ± 190	1,4 ± 0,4	0,25
Свинец	170 ± 40	4,8 ± 1,2	2,82
Цинк	1380 ± 280	37 ± 6	2,68
Кобальт	52 ± 21	1,4 ± 0,4	2,70
Проба № 3			
Марганец	790 ± 240	72 ± 11	9,1
Железо	53000 ± 15000	2,4 ± 0,6	0,005
Кадмий	40 ± 20	4,4 ± 1,1	11,0
Хром	320 ± 60	0,66 ± 0,20	0,21
Медь	420 ± 80	36 ± 5	8,6
Никель	65 ± 23	1,6 ± 0,4	2,5
Свинец	70 ± 18	2,0 ± 0,5	2,9
Цинк	1480 ± 300	72 ± 11	4,9
Кобальт	27 ± 11	0,74 ± 0,22	2,7

бляемым реагентом при этом является ацетатно-аммонийный буферный раствор с pH 4,8 (СанПиН 1.2.3685-21), который моделирует переход ТМ из твердой фазы в жидкую. Использование этой вытяжки было обусловлено наличием разработанных и утвержденных значений предельно допустимых и ориентировочно допустимых концентраций (ПДК и ОДК) на некоторые химические элементы.

Анализ проб золы на содержание химических элементов выявил наличие в ней высоких концентраций некоторых ТМ и их превышение над утвержденными Минздравом показателями (СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования...»). Их повышенное содержание обусловлено преимущественно стоками промышленных предприятий.

Необходимо отметить, что некоторые соединения ТМ, находящиеся в составе золы, при контакте с кислыми поверхностными, грунтовыми и почвенными водами могут переходить в подвижные формы, что способствует их миграции в водные объекты, почву, растения. Наибольшей подвижностью в пробах характеризуются следующие элементы: кадмий (7,8–11% от валовых форм), марганец (8,8–9,8%), медь (6,97–8,6%). Подвижные формы никеля, свинца, цинка и кобальта составляют до 5% от валовых форм, а подвижные формы хрома, алюминия, железа присутствуют в количестве меньше 1%. Ртуть и мышьяк при сгорании органического вещества летят в воздух, поэтому в пробах золы находятся ниже пределов обнаружения.

Что касается влияния золы на окружающую среду, определенное опасение вызывает кадмий, присутствующий в повышенных количествах как в валовой, так и в подвижной форме. Его содержание в 14–20 раз превышает утвержденное значение ОДК, которое составляет 2 мг/кг для суглинистых почв с нейтральной реакцией среды. Этот элемент согласно «Классификации химических веществ для контроля загрязнения» (ГОСТ 70281-2022) относится к 1-му классу опасности.

Извлечение ТМ из проб золы, имеющих щелочную реакцию, кислым ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4,8 на наш взгляд не дает возможности корректно отразить количественное содержание тяжелых металлов, способных мигрировать в растительную продукцию. Более информативным способом определения содержания химических элементов в золе, способных мигрировать в окружающую среду, является определение их в вытяжке, приближенной по реакции среды к выпадающим атмосферным осадкам.

При определении содержания ТМ в водной вытяжке из золы ОСВ (водорастворимая форма) установлено их наличие в количестве сотых и десятых долей мг/кг. По результатам анализа 3 проб золы значения по содержанию химических элементов колебались в следующих пределах: массовая доля кобальта 0,045–0,070 мг/кг, марганца 0,205–1,110 мг/кг, меди 0,025–0,080 мг/кг,

кадмия 0,008–0,02 мг/кг, никеля 0,040–0,265 мг/кг, цинка 0,122–0,347 мг/кг, свинца 0,250–0,350 мг/кг, хрома 0,110–0,175. В то же время следует отметить, что при произрастании растений вследствие корневых выделений и постепенном изменении реакции среды в кислую сторону, содержание водорастворимых форм тяжелых металлов может увеличиваться. Этот факт необходимо учитывать, так как имеются публикации по использованию золы ОСВ в качестве удобрений [24, 26, 29, 32].

Результаты определения физико-химических свойств золы ОСВ представлены в таблице 4. Следует отметить, что согласно ГОСТ 17.4.4.01-84 полученные результаты по определению емкости катионного обмена (ЕКО), гидролитической кислотности, а также некоторых других показателей выражаются в мг-экв/100 г, что соответствует эквивалентному содержанию вещества, выраженному в ммоль/100 г, принятому в Международной системе СИ, то есть численно результаты анализа, выраженные в миллимолях эквивалентов и в миллиграмм-эквивалентах равны. В настоящее время основной единицей количества в системе СИ является моль (mol).

Агрохимические показатели золы ОСВ характеризуют обеспеченность необходимыми для роста растений питательными элементами. Представленные в таблице 4 показатели свидетельствуют о том, что она имеет щелочную реакцию среды, высокие численные значения зольности и низкие показатели гидролитической кислотности. При этом содержание основных элементов питания растений в пробах золы не сбалансировано. С позиций обеспеченности растений основными питательными элементами в золе в избыточном количестве содержатся калий и фосфор, но она практически лишена соединений азота.

Содержание элементов питания – фосфора и калия – определено в разных вытяжках и характеризуется различными количественными значениями. Эти показатели существенно превышают принятые в почвоведении оценочные уровни по обеспеченности почв питательными элементами как сельскохозяйственных, так и лесных почв. Основным показателем почв, отличающим ее от минеральных грунтов и горных пород, выносимых на дневную поверхность при разработке месторождений полезных ископаемых, является наличие в верхнем слое почвы органического вещества, обладающего плодородием. Однако в золе вследствие высокотемпературной обработки сырого осадка содержание органического вещества не превышает 3%.

Об обеспеченности почв потенциально доступными соединениями фосфора и калия судят по установленным показателям. Так, при содержании фосфатов в вытяжке, полученной по методу Чирикова, в количестве 10–20 мг P_2O_5 на 100 г почвы (в зависимости от вида выращиваемых культур и их потребности в

питательных элементах) почвы считаются высокообеспеченными этим элементом и не нуждаются во внесении фосфорных удобрений. В вытяжке, полученной по методу Мачигина, показатель обеспеченности составляет 3–6 мг P_2O_5 на 100 г [1]. Как видно из таблицы 4, содержание фосфора в золе во много раз превышает оптимальные значения его содержания в почвах сельскохозяйственных угодий.

В результате комплексной оценки проб золы ОСВ как субстрата для произрастания растений с учетом содержания ТМ необходимо отметить следующее. Такие присутствующие в золе элементы, как кобальт, медь, цинк, марганец, являются необходимыми для нормального роста и развития растений. Эти элементы при недостатке их в почве в виде солей и соединений используются для удобрения почв с целью повышения урожайности сельскохозяйственных культур. В подзолистых почвах северо-западного региона отмечается недостаток этих элементов. При недостаточном содержании их в почве эти элементы относят к микроэлементам, тогда как при избыточном их содержании они переходят в категорию тяжелых металлов. По нашему мнению, повышенное содержание ТМ в золе не является критичным, если рассматривать полигон золы в будущем как объект санитарно-гигиенического направления рекультивации. Вряд ли следует рассматривать полигоны золы от сжигания ОСВ как объекты сельскохозяйственного направления рекультивации сразу после доведения их поверхности до проектных отметок. Они могут быть использованы под объекты промышленного назначения, рекреационного и лесохозяйственного использования при проведении необходимых дополнительных исследований и обосновании выбранных направлений хозяйственного использования земель. В то же время при извлечении фосфора из золы ОСВ необходимо учитывать возможный переход повышенных количеств ТМ при последующем использовании удобрения для сельскохозяйственных культур.

Следует также отметить сложность подбора метода анализа для правильной оценки свойств золы. К анализу золы применялись методы, принятые в почвоведении. Но зола – это не почва, а потому существуют определенные сложности как в подборе методов анализа, так в интерпретации полученных результатов. Сложно на начальных этапах исследований оценить приемлемость тех или иных методов анализа для правильной оценки золы. В почвоведении и агрохимии на протяжении многих лет, а точнее десятилетий, на основе различных видов и методов анализа почвенных проб: применения разных реагентов и вытяжек, проведения лабораторных, вегетационных и полевых опытов, на различных типах почв устанавливались корреляционные зависимости между химическими показателями и урожайностью культур. Однако зола ОСВ является новым необычным и слабо изученным субстратом, требующим проведения исследований, подбора и разработки подходящих методов анализа.

Применение золы для рекультивации

С учетом слабой изученности золы как субстрата для биологической рекультивации, а также сложности и неоднозначности интерпретации полученных результатов химического анализа, и ввиду того, что трудно объяснимые факты как в почвоведении, так и в рекультивации нарушенных земель, как правило, решаются экспериментальным путем, на полигоне Северных очистных сооружений в конце августа 2023 года был заложен полевой опыт. Выбор этого времени был обусловлен погодными условиями: к концу лета температура воздуха понижается, а количество осадков увеличивается. Полив растений на опытном участке не производился.

Предварительно на опытный участок было завезено с завода по сжиганию осадков несколько машин свежей золы и выполнена грубая планировка бульдозером. Вручную были срезаны повышения, засы-

Табл. 4

Физико-химические свойства золы осадка сточных вод

№ пробы	рН водный	Зольность, %	Емкость катионного обмена, ммоль/100 г	Гидролитическая кислотность, ммоль/100 г	Содержание, мг/100 г					
					P_2O_5			K_2O		
					1	2	3	1	2	3
1	8,6	98,3	4,0	< 0,23	1962	58,8	42,0	1372,0	879,0	390,0
2	7,9	98,8	1,0	< 0,23	1517	48,8	34,0	1276,0	794,0	380,0
3	8,1	98,2	4,0	< 0,23	1636	52,1	35,0	1180,0	527,0	365,0

Примечание: содержание P_2O_5 и K_2O в золе определено (1) методом Чирикова, (2) методом Мачигина, (3) в водной вытяжке (водорастворимая форма).

паны понижения, проведено поверхностное уплотнение. Завезенная на участок зола характеризовалась ярко оранжевой окраской и очень рыхлым сложением, обусловленным высокой пористостью субстрата. При ходьбе по отсыпанной территории зола уплотнялась, ноги проваливались на глубину 10–20 см, как при ходьбе по рыхлому снегу. Общая площадь отсыпанного золой участка составляла 500–550 м². Толщина нанесенного слоя золы в разных местах была различной – от 30 см с краев до 60 см.

В центральной части отсыпанного золой участка с помощью шнура и колышков были заложены 2 грядки протяженностью по 15 метров. Общая площадь грядок составляла 30 м². Грядки были разделены на квадратные метры. На одну продольную грядку была внесена аммиачная селитра с содержанием азота 34%, из расчета 40 г действующего вещества азота на квадратный метр, на другую грядку было внесено органоминеральное удобрение (ОМУ) для газонных трав по 40–60 г на квадратный метр. Каждый вид высевался на двух квадратных метрах с разными видами внесенных в золу удобрений. Семена и удобрения были граблями заделаны в золу. Смесь оставшихся от посева на грядки семян была высеяна справа и слева от засеянных грядок на части отведенной площади. Часть площади не засеивалась, в нее не вносились удобрения, эта территория использовалась в качестве контроля.

На опытном участке было высеяно 15 видов трав: райграс пастбищный (*Lolium perenne*), овсяница луговая и красная (*Festuca rubra* и *F. pratensis*), тимофеевка луговая (*Phleum pratense*), клевер белый и луговой (*Tri-*

folium alba и *T. pratense*), полевица побегообразующая (*Agrostis stolonifera*), мятлик луговой (*Poa pratensis*), колосняк песчаный (*Leymus arenarius*) и другие, имеющие различный тип кущения корневых систем: рыхлокустовой, корневищный, стержневой. Общий вид опытного участка через 1 месяц после заложения опыта представлен на рис. 1, а весной 2024 года – на рис. 2.

В осенний период после обильных дождей, а также весной 2024 года после схода снега зола на участке была насыщена водой настолько, что по ней было невозможно ходить. В конце мая 2024 года после нескольких дней жаркой погоды сверху зола подсыхала, но нижние слои золы находились в состоянии, насыщенном влагой. Проход по участку был невозможен (фотографии были сделаны с прилегающей территории, сложенной естественным грунтом). Этот факт предопределяет необходимость изучения водно-физических свойств золы не только для биологического этапа рекультивации, но и для разработки технологий технического этапа рекультивации полигона.

Осенью в год посева и ранней весной травы характеризовались замедленным ростом и развитием (рис. 1 и 2). Визуально в весеннее время и начале лета высеянные многолетние травы выглядели немного лучше на грядке, где вносилось органоминеральное удобрение. Высота растений на этом участке была на 5–7% выше, зеленая окраска травы более насыщенной. По-видимому, внесение органоминерального удобрения (ОМУ) оказывало на развитие растений более существенное положительное влияние по сравнению с внесением минерального азотного удобрения.

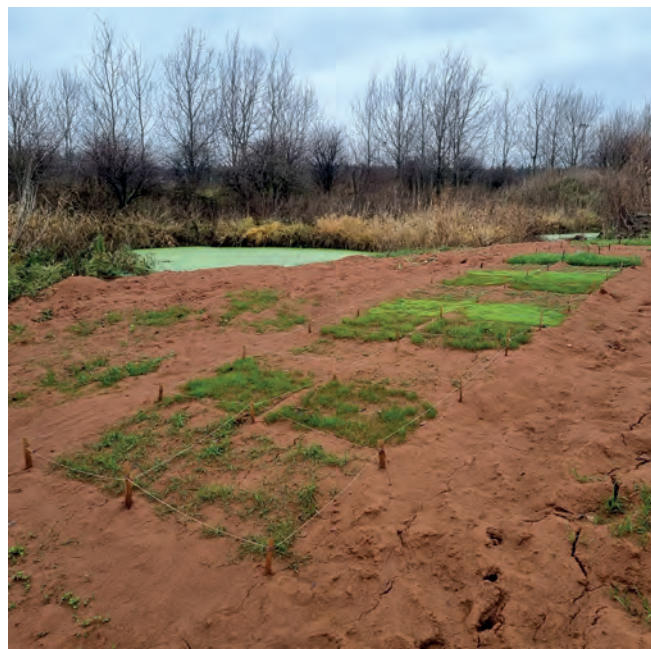


Рис. 1. Общий вид опытного участка через 1 месяц после заложения опыта



Рис. 2. Общий вид опытного участка в конце мая 2024 года

Весной, в конце мая зафиксировано внедрение на прилегающие к грядкам участки золы первых аборигенных (местных) видов растений с окружающей местности. К середине лета число дикорастущих видов, внедрившихся на отсыпанный золой участок, превысило 30. Проективное покрытие участка травянистой растительностью достигло 70–100%. Преобладающими среди заносных растений являются тростник обыкновенный (*Phragmites australis*), мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara*), ромашка непахучая (*Matricaria inolora*), осот полевой (*Sonchus arvensis*), марь городская (*Chenopodium urbicum*), полынь обыкновенная (*Artemisia vulgaris*). Многие растения – клевер красный, осот полевой, кипрей волосистый, ромашка непахучая, цикорий обыкновенный, пижма и другие – находились в стадии цветения, а отдельные виды вступили в генеративную фазу. Зафиксировано наличие всходов кустарника ивы филолистной (*Salix phylicifolia*) высотой 30–35 см, а также появление моховой растительности на поверхности золы. Дикорастущие виды растений поселились не только на свободных местах, но и внедрились в опытные посевы. Высота большинства дикорастущих видов растений достигала 50–60 см. Осенью 2024 года по результатам обследования, проведенного в сентябре-октябре, участки с относительно разреженным растительным покровом (70–80%) были полностью покрыты моховой растительностью. На рисунках 3, 4, 5 представлены участки с различными видами растений, поселившихся на отведенной для опыта площади (снимки сделаны во второй половине июля 2024 года).

Быстрое зарастание отсыпанного золой участка, по нашему мнению, обусловлено его незначительной площадью 500–550 м², и поэтому легкостью заноса семян растений с окружающей местности. На всей площади участка, несмотря на жаркую летнюю погоду, в нижнем слое золы сохранялось достаточное количество влаги, необходимой для роста растений. Скорость формирования растительного покрова на золе во много раз происходит быстрее, чем на землях, нарушенных горнодобывающими и строительными предприятиями. На этих территориях самозарастание происходит на протяжении многих лет. Поэтому целесообразно проведение анализов по химическому составу растений, поселившихся на золе в сравнении с растениями, выросшими на других участках, а также анализ атмосферного воздуха, чтобы выяснить, что же лежит в основе необычайно быстрого роста растений на золе? По этому вопросу нужны дополнительные исследования.

Несмотря на высокое содержание ТМ, отсутствие соединений азота, очень низкое содержание органического вещества, несбалансированность элементов питания растений, в течение первого же вегетационного сезона весь опытный участок (включая контроль), независимо от того, вносились удобрения или не вносились, был заселен полностью травянистыми видами, произрастающими поблизости. В результате простейших приемов рекультивации (подготовка участка и посев многолетних трав) и природного процесса заноса на участок семян дикорастущих растений и их разрастания формируется растительный покров, способный закрепить поверхность, противостоять эрозии, улучшить санитарно-гигиенические условия.



Рис. 3. Растительное сообщество, сформировавшееся по границе засеянного участка (слева) и заросшего контрольного участка (справа)



Рис. 4. Естественное зарастание опытного участка



Рис. 5. Самозарастание опытного участка, на переднем плане кипрей волосистый, на заднем – заросли ромашки непахучей

Проведенный эксперимент и значительное количество видов, внедрившихся на участок, позволяют сделать вывод об относительно благоприятных свойствах золы Северных очистных сооружений как рекультивационного материала. А учитывая современные требования к определенным категориям нарушенных земель, предусмотренные Национальным стандартом РФ ГОСТом Р 57446-2017 «Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия», этот субстрат следует считать пригодным для роста растений и осуществления санитарно-гигиенического направления рекультивации. По нашему мнению, целесообразно также рассмотреть отвалы золы на предмет пригодности к лесохозяйственному и рекреационному направлению рекультивации.

Заключение

Нерешенность проблемы промышленной утилизации золы, полученной при сжигании ОСВ, ее значительное количество, которое ежегодно образуется на очистных сооружениях Санкт-Петербурга, обусловили необходимость изучения состава и свойств золы с позиций перспективной рекультивации полигонов.

Исследованы гранулометрический и вещественный состав, геохимические и физико-химические свойства золы, полученной от сжигания сырого осадка сточных вод на Северных очистных сооружениях Санкт-Петербурга как субстрата для биологической

рекультивации. По гранулометрическому составу зола является легким пылеватым суглинком или пылевой супесью, характеризуется значительным пылеобразованием и отрицательным влиянием на окружающую среду. Уровень содержания в золе валовых и подвижных форм некоторых ТМ превышает установленные Минздравом РФ нормативы ПДК и ОДК химических элементов в почве. Установлена несбалансированность содержания в золе основных питательных элементов: отсутствие соединений азота, очень высокие содержания калия и фосфора. На полигоне Северных очистных сооружений для оценки возможности проведения санитарно-гигиенического направления рекультивации был заложен мелко-деляночный полевой опыт. К концу июля 2024 года всего лишь за один вегетационный сезон на опытном участке сформировалось растительное сообщество с 70–100%-м покрытием травянистой растительностью, что свидетельствует о необычайно быстром развитии растений на этом субстрате и возможности санитарно-гигиенического направления рекультивации полигона при доведении его до проектных отметок.

Автор выражает признательность коллегам: Е.А. Горбуновой, Т.В. Бардиной, А.А. Галдянцу за помощь в заложении полевого опыта.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FFZF-2025-0018).

Литература

1. Аринушкина ЕВ. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ; 1970. С. 488.
2. Валетов ДС, Кащенко ОВ. Сжигание осадков сточных вод как метод их утилизации. *Academy*. 2018;12(39):20-3.
3. Валиев ВС, Иванов ДВ, Шагидуллин РР. Анализ мирового опыта утилизации осадка городских сточных вод. *Российский журнал прикладной экологии*. 2020;4:43-51. DOI: 10.24411/2411-7374-2020-10033.
4. Валиев ВС, Иванов ДВ, Шагидуллин РР. Способы утилизации осадков городских сточных вод (обзор). *Российский журнал прикладной экологии*. 2020;4(24):52-63. DOI: 10.24411/2411-7374-2020-10034.
5. Векшин АА, Рассохина ЕВ, Дягелев МЮ, Исаков ВГ. Сжигание осадка как безотходный способ утилизации осадка сточных вод. *Приволжский научный журнал*. 2023;2:100-7.
6. Волкова ЕН, Антонов ИВ, Здоровцева АГ, Закарлюкина ВП. Изучение токсичности золы от сжигания осадков сточных вод с использованием инфузорий *Parameciumcaudatum*. В кн.: *Фундаментальные и прикладные научные исследования: Актуальные вопросы, достижения и инновации. Часть 1*. Пенза: Наука и просвещение; 2018. С. 67-9.
7. Волкова ЕН, Какимов МГ. Изучение физических свойств золы от сжигания осадка сточных вод. В кн.: *Сборник научных трудов по материалам 8-й Международной научно-практической конференции. «Экологические проблемы промышленных городов»*. Саратов: Саратовский государственный технический университет; 2017. С. 13-7.
8. Волкова ЕН, Осипова ТС, Какимов МГ. Оценка возможности использования золы от сжигания осадка сточных вод для улучшения свойств

- дерново-подзолистой почвы. В кн.: IV Лужские научные чтения. «Современное научное знание: Теория и практика». СПб.: Изд-во ЛГУ им. А.С. Пушкина; 2016. С. 71-3.
9. Зубова ОВ, Силецкий ВВ. Изменение свойств материала на основе золы и вяжущих для строительства лесных дорог. В кн.: Научно-техническая конференция Института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета; 2019. С. 134-7.
 10. Кармазинов ФВ, Васильев БВ, Григорьева ЖЛ. Сжигание осадка сточных вод – решение проблемы их утилизации. Водоснабжение и санитарная техника. 2008;9:9-24.
 11. Крымская ЕЯ, Чукалина ЕМ. Состав и структура золы из сточных осадков как разновидность грунта. Науковедение. 2013;2(15):1-9. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/10tvn213.pdf>.
 12. Литвинова ТЕ, Сучков ДВ. Получение легкого золобетона как перспективное направление утилизации техногенных продуктов (на примере отходов водоотведения). Записки Горного института. 2023;264:906-18.
 13. Манжина СА. Российские и зарубежные практики обращения с осадком сточных вод. Экология и водное хозяйство. 2023;1:15-31. DOI: 10.31774/2658-7890-2023-5-1-15-31.
 14. Минаев АН, Зубова ОВ, Кулик ДМ, Силецкий ВВ, Луговой ВИ. Применение золополимерных смесей в строительстве лесовозных дорог. Лесной журнал. 2020;3(375):106-16. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-106-16.
 15. Поповцева АА, Дьяков МС. Научно-практические основы использования золы сжигания осадка городских сточных вод в производстве строительных материалов. Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2015;1:278-82.
 16. Смирнов ЮД, Сучкова МВ. Перспективы полезного использования золы сжигания осадка сточных вод в народном хозяйстве. Вода и экология: проблемы и решения. 2019;3(79):16-25. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.3.16-25.
 17. Тенно Т. Рекуперация фосфора из осадка сточных вод. [Электронный ресурс]. 2021. URL: <https://www.good-climate.com/materials/files/219.pdf> (дата обращения: 22.02.2024).
 18. Тихонова ИО. Утилизация иловых осадков в экономике замкнутого цикла: опыт Германии. Экология производства. 2020;6:74-7.
 19. Цыбина АВ, Дьяков МС, Вайсман ЯИ. Перспективное направление утилизации продуктов термической обработки осадков сточных вод в производстве керамических строительных материалов. Фундаментальные исследования. 2014;6-2:265-70.
 20. Чулкова ИЛ, Смирнова ОЕ, Красова АВ. Применение осадков сточных вод в производстве бетона. Вестник СибАДИ. 2021;18(5):566-75. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-5-566-75.
 21. Шахов СА. Вещественный состав и свойства золы от сжигания осадка бытовых сточных вод. Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2023;2:31-39. DOI: 10.14529/build230204.
 22. Шахов СА, Николаев НЮ. Фасадная керамика с дисперсно-армированной структурой на основе золы от сжигания осадков бытовых сточных вод. В кн.: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации». Омск: Изд-во СибАДИ; 2019. С. 391-4.
 23. Bezak-Mazur E, Widak M, Gawdzik J, Stoinska R, Zapala-Slaveta J, Ciopińska J. Properties of ashes formed after the combustion of sewage sludge. E3SWeb of Conferences 44. 2018. DOI: 10.1051/e3sconf/20184400012.
 24. Borowski G. Using vitrification for sewage sludge combustion ash disposal. Polish J Environ Stud. 2015;24(5):1889-96. DOI: 10.15244/pjoes/36080.
 25. Huang Y, Chen Z, Liu Y, Lu J, Bian Z, Yio M, Cheeseman C, Wang F, Poon Chi Sun. Recycling of waste glass and incinerated sewage sludge ash in glass-ceramics. Waste Manag. 2024. DOI: 10.1016/j.wasman. 023.12.007.
 26. Jastrzębska M, Kostrzevska M. Using an environment-friendly fertiliser from sewage sludge ash with the addition of *Bacillus megaterium*. Minerals. 2019;9(7):423. DOI:10.3390/min9070423.19.
 27. Ki D, Kang SY, Park K-M. Upcycling of wastewater sludge incineration ash as a 3D printing technology.Resource. 2021;2. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsus.2021.697265>.
 28. Lin WY, Ng WC, Wong BSE, Teo SLM, Sivananthan GD/O, Baeg GH, Ok YS, Wang CH. Evaluation of sewage sludge incineration ash as a potential land reclamation material.JHazardousMater. 2018. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.05.047.
 29. Lin X, Chen C, Li H, Hei L, Zeng L, Wei Z, Chen Y, Wu Q-T. Comprehensive recycling of fresh municipal sewage sludge to fertilize garden plants and achieve low carbon emission: A pilot study. Front Environ Sci. 2022;10. 1023356. DOI: 10.3389/fenvs.2022.1023356.
 30. Silva RV, de Brito J, Lynn CJ, Dhir RK. Use of municipal solid waste incineration bottom ashes in

- alkali-activated materials, ceramics and granular applications: A review. *WasteManag.* 2017;207-20. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.06.043.
31. Sun X, Dregulo AM, Kumar SM, Pandey A, Kumar AM. Sewage sludge treatment and management. *Boca Raton.* 2023;3-14. DOI: 10.1201/9781003354765.
 32. Vogel T, Nelles M, Bettina Eichler-Löbermann. Phosphorus effects of recycled products from municipal wastewater on crops in a field experiment. *Plant Soil Environ.* 2017;63(10):475-82. DOI: 10.17221/513/2017-PSE.
 33. Zhang M, Tashiro Y, Ishida N, Sakai K. Application of autothermal thermophilic aerobic digestion as a sustainable recycling process of organic liquid waste: Recent advances and prospects. *Sci Total Environ.* 2022;828. 154187. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154187.

