

ЭКОЛОГИЯ

Обзорная статья

УДК 628.1

doi: 10.31774/2658-7890-2023-5-1-15-31

Российские и зарубежные практики обращения с осадком сточных вод

Светлана Александровна Манжина

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация, manz.svetlana@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9322-0843>

Аннотация. **Цель:** анализ лучших практик обращения с осадком сточных вод у нас в стране и за рубежом. **Обсуждение.** Качественный состав осадков сточных вод варьируется в зависимости от состава сточных вод, характеристик очистных сооружений и применяемых способов очистки. Выбор способа утилизации осадков зависит прежде всего от экологических и социальных факторов. Экологический фактор определяется в первую очередь присутствием патогенных микроорганизмов и гельминтов, тяжелых металлов и биогенных веществ. Проблема с гельминтами и патогенными микроорганизмами решается дезинфекцией и стабилизацией осадков сточных вод. Проблема с тяжелыми металлами решается посредством их иммобилизации. Биогенный состав осадка сточных вод, и в первую очередь содержание азота и фосфора, предопределяет его удобрительную ценность для растениеводства. Основной негативной составляющей, определяющей качество осадков сточных вод, является наличие в них тяжелых металлов. В работе приведены статистические данные о содержании тяжелых металлов в осадках сточных вод различных стран. Социальный аспект определяет наличие сельскохозяйственных площадей, соответствующих технологий, спроса на определенный вид ресурса, а также экономические показатели полученного результата. **Выводы.** В настоящее время в мировой практике нет единого мнения о допустимом содержании загрязняющих веществ в осадках сточных вод при применении их в качестве удобрений. Не исключение и российские стандарты, что требует научно обоснованной доработки с целью усовершенствования требований к качеству осадков сточных вод в случае дальнейшего их использования в сельском хозяйстве страны.

Ключевые слова: осадок сточных вод, удобрение, качественный состав, биогенные вещества, тяжелые металлы, сжигание осадков сточных вод, иловые осадки, городские очистные сооружения

Для цитирования: Манжина С. А. Российские и зарубежные практики обращения с осадком сточных вод // Экология и водное хозяйство. 2023. Т. 5, № 1. С. 15–31. <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2023-5-1-15-31>.

ECOLOGY

Review article

Russian and foreign practices of sewage sludge management

Svetlana A. Manzhina

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation, manz.svetlana@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9322-0843>

Abstract. Purpose: to analyze the best practices for sewage sludge management both in our country and abroad. **Discussion.** The qualitative composition of sewage sludge varies depending on the wastewater composition, the characteristics of treatment facilities and the treatment methods used. The choice of sludge disposal method depends primarily on environmental and social factors. The environmental factor is determined primarily by the presence of pathogenic microorganisms and helminths, heavy metals and biogenic substances. The problem with helminths and pathogenic microorganisms is solved by disinfection and stabilization of sewage sludge. The problem with heavy metals is solved by their immobilization. The biogenic composition of sewage sludge, and primarily the nitrogen and phosphorus content, predetermines its fertilizer value for crop production. The main negative component that determines the quality of sewage sludge is the presence of heavy metals in them. The statistical data on the content of heavy metals in sewage sludge from various countries are presented. The social aspect determines the availability of agricultural areas, appropriate technologies, demand for a certain type of resource, as well as economic indicators of the result obtained. **Conclusions.** Currently, in world practice there is no consensus on the permissible content of pollutants in sewage sludge when they are used as fertilizers. The Russian standards are no exception, which require scientifically based revision to improve the requirements for the sewage sludge quality for their further use in the country's agriculture.

Keywords: sewage sludge, fertilizer, qualitative composition, biogenic substances, heavy metals, sewage sludge incineration, sludge, urban wastewater treatment plants

For citation: Manzhina S. A. Russian and foreign practices of sewage sludge management. *Ecology and Water Management*. 2023;5(1):15–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2023-5-1-15-31>.

Введение. В современных реалиях обеспечение населения качественным водоснабжением сопряжено с образованием большого количества крупнотоннажных отходов. Одним из таких крупнотоннажных отходов является осадок сточных вод (ОСВ), ежегодное накопление которого в мире оценивается в 200 млрд т при средней влажности 96 %, в т. ч. в России – свыше 100 млн м³ [1]. В соответствии с ГОСТ Р 59748-2021¹, «осадки сточных вод: смесь минеральных и органических веществ, выделяемых из сточных вод в процессе их механической, биологической, физико-химической и реагентной очистки, в т. ч. избыточный активный ил, выведенный из технологического процесса биологической очистки».

Размещение такого количества ОСВ на полигонах сопряжено с негативными экологическими процессами, такими как: изъятие из оборота земельных площадей, неприятный запах, инфильтрация жидких

¹ГОСТ Р 59748-2021. Технические принципы обработки осадков сточных вод. Общие требования. Введ. 2021-11-01. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. 26 с.

стоков, входящих в состав отхода, выделение летучих углеводородов и других газов, в связи с чем человеческое сообщество озадачено поиском путей решения вопроса утилизации этого крупнотоннажного отхода [1–6]. Более того, ряд авторов отмечают, что через несколько лет регулярной эксплуатации полигонов в глубинных слоях складированного отхода регистрируются признаки разогрева ОСВ: выделение дыма и неприятного запаха, что по факту может являться последствием процессов брожения [7].

Целью исследования на данном этапе является анализ лучших практик обращения с ОСВ у нас в стране и за рубежом.

Обсуждение. Выбор способа утилизации любого крупнотоннажного отхода, в т. ч. ОСВ, зависит от экологических и социальных факторов.

Имеет значение возможность сокращения массы полученного осадка, которое может достигаться путем термического, механического или химического воздействия на него (рисунок 1) [8]. Экологический фактор определяется в первую очередь химическим составом ОСВ и присутствием патогенных микроорганизмов и гельминтов. Качественный состав ОСВ варьируется в зависимости от состава сточных вод, подаваемых на муниципальные системы очистки, характеристик очистных сооружений по их оснащенности и применяемых способов очистки. Проблема с гельминтами и патогенными микроорганизмами решается дезинфекцией, термическим воздействием и стабилизацией ОСВ². Дезинфекция предполагает добавление обеззараживающих веществ, которое чаще всего осуществляется прямо на выходе осадка перед размещением его в шламохранилищах и на иловых площадках. Стабилизация

²Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85: СП 32.13330.2012: введ. в действие с 01.01.13. М.: Минрегион России, 2012. 97 с.

может быть неполной (временной) или необратимой в зависимости от способа (рисунок 1).

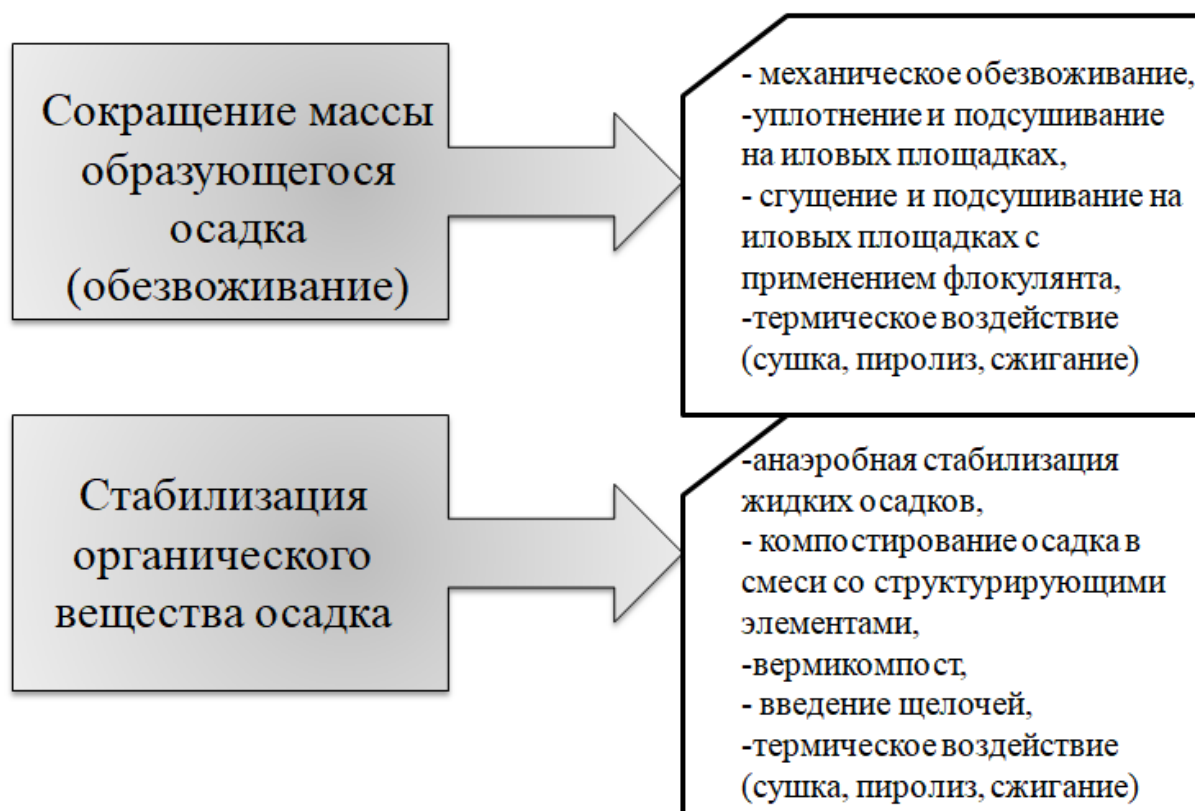


Рисунок 1 – Способы обращения с осадком сточных вод

Figure 1 – Methods for sewage sludge management

Из-за специфики образования отхода в нем присутствует значимое количество биогенных веществ (таблица 1) и поллютантов, в т. ч. тяжелых металлов.

Основной негативной составляющей, определяющей качество ОСВ, является наличие в них тяжелых металлов (таблица 1), которые образуют соли: сульфаты, фосфаты, гидроксокарбонаты, сульфиды и т. д. Тяжелые металлы оказывают токсическое воздействие на живые организмы, поэтому их определение имеет особую значимость при принятии решения о способе утилизации ОСВ.

Таблица 1 – Статистические данные о содержании тяжелых металлов в осадках сточных вод по данным из разных стран (по материалам X. Zhang, X.-q. Wang, D.-f. Wang [9] с дополнениями)

В мг/кг сухого веса

Table 1 – Statistical data on the content of heavy metals in sewage sludge according to data from different countries (based on X. Zhang, X.-q. Wang, D.-f. Wang [9] with additions)

In mg/kg dry weight

Страна	Вид и степень подготовки ОСВ	Содержание тяжелого металла									Ссылка
		Cd	Pb	Cu	Zn	Cr	Ni	Mn	As	Hg	
Италия	Осадок бытовых сточных вод	1,36	70,7	456,6	1260,8	39,6	31,2	–	–	0,6	[10]
Иран	Обезвоженный, анаэробно переработанный ОСВ	4,1	169,0	330,0	1908,0	213,0	110,0	–	–	–	[11]
Португалия	Обезвоженный ОСВ	1,0	< 5,6	140,8	757,2	< 5,6	22,6	–	–	< 1,3	[12]
Испания	Анаэробный ОСВ	2,5	164,0	202,0	497,0	25,5	20,5	–	–	–	[13]
Бразилия	Обезвоженный ОСВ	1,6	26,3	202,0	690,0	260,0	54,6	–	–	–	[14]
Бразилия	Компостирование вышеупомянутого ОСВ	1,2	19,7	152,0	517,0	195,0	–	–	–	–	[15]
Египет	Исходный ОСВ	4,0	750,0	538,0	1204,0	–	81,0	–	–	–	[16]
Япония	Обезвоженный анаэробно переработанный ОСВ	73,0	122,1	415,0	750,6	150,2	638,5	–	–	–	[17]
Франция	Активированный ОСВ	0,6	19,7	149,0	548,0	27,6	26,4	–	–	–	[18]
Турция	Получено с объекта по обработке ОСВ	0,6	–	198,0	860,0	30,6	38,5	390,0	–	–	[9]
КНР	107 образцов ОСВ из 48 городов (среднее значение)	3,9	112,2	499,1	2088,0	259,2	166,9	–	25,2	3,2	[9]
ФРГ	Обезвоженный осадок	0,74	30,6	293,6	772,8	32,6	24,7	–	–	0,39	[19]
Украина (г. Харьков)	Обезвоженный осадок	16,7	7,0	746,9	1101,9	63,0	64,5	625,7	–	–	[20]
РФ (г. Москва)	Обезвоженный осадок	10,0	36,0	430,0	1670,0	380,0	104,0	–	–	–	[21]
РФ (г. Санкт-Петербург)	Обезвоженный осадок	26,0	52,0	445,0	960,0	260,0	130,0	–	–	–	[21]
РФ (г. Луганск)	Осадок бытовых сточных вод	57,0	111,0	277,0	611,0	214,0	391,0	358,0	–	–	[22]

Содержание тяжелых металлов в ОСВ регулируют посредством их иммобилизации [23], например, при помощи сорбента либо реагента для перевода их в нерастворимые формы. Иммобилизация является дорогостоящим и трудоемким процессом и не решает вопроса с выведением тяжелых металлов из смеси, что в дальнейшем может привести к возвращению им активной формы. Варианты с реагентным³ и реагентно-биологическим⁴ выщелачиванием тяжелых металлов из ОСВ носят также более локальный характер и неприменимы в масштабах шламохранилищ и иловых карт.

Биогенный состав ОСВ, и в первую очередь содержание азота и фосфора, предопределяет его удобрительную ценность для растениеводства (таблица 2).

Таблица 2 – Содержание биогенных веществ в осадках сточных вод [8]
В % от массы сухого вещества

Table 2 – The content of nutrients in sewage sludge [8]

In % of dry matter mass

Вид осадка	Содержание биогенных элементов		
	азота общего	фосфора общего (в пересчете на P ₂ O ₅)	калия общего (в пересчете на K ₂ O)
Сырой осадок	1,6–6,0	0,6–5,2	0,1–0,6
Сброженный осадок	1,7–7,5	0,9–6,6	0,2–0,5
Активный ил	2,4–10,0	2,3–8,0	0,3–0,4
Смесь осадка первичных отстойников и активного ила	2,0–8,0	1,0–7,0	0,2–0,5

Социальный аспект при выборе способов обращения с ОСВ и их утилизации обусловлен: наличием сельскохозяйственных площадей, наличием потребностей в определенном виде ресурса (спроса), имеющимися технологиями, их эффективностью и финансовой затратностью, а также

³Пат. 2174964 Российская Федерация, МПК С 02 F 11/14. Способ извлечения тяжелых металлов из избыточного активного ила / Зыкова И. В., Панов В. П., Макашова Т. Г.; патентообладатель С.-Петерб. гос. ун-т технологии и дизайна. № 2000101266; заявл. 17.01.00; опубл. 20.10.01, Бюл. № 29. 6 с.

⁴Пат. 2057088 Российская Федерация, МПК С 02 F 11/00, 101/20, 103/00. Способ обработки осадков сточных вод с удалением тяжелых металлов (вариант) / Данилович Д. А., Аджиенко В. Е.; патентообладатели Д. А. Данилович, В. Е. Аджиенко. № 94014959/25; заявл. 25.04.94; опубл. 27.03.96. 7 с.

экономическими выгодами от получаемого конечного результата. Например, в странах Европы обращение с ОСВ адаптировано к местным социально-экономическим условиям и носит весьма разнородный характер (рисунок 2).

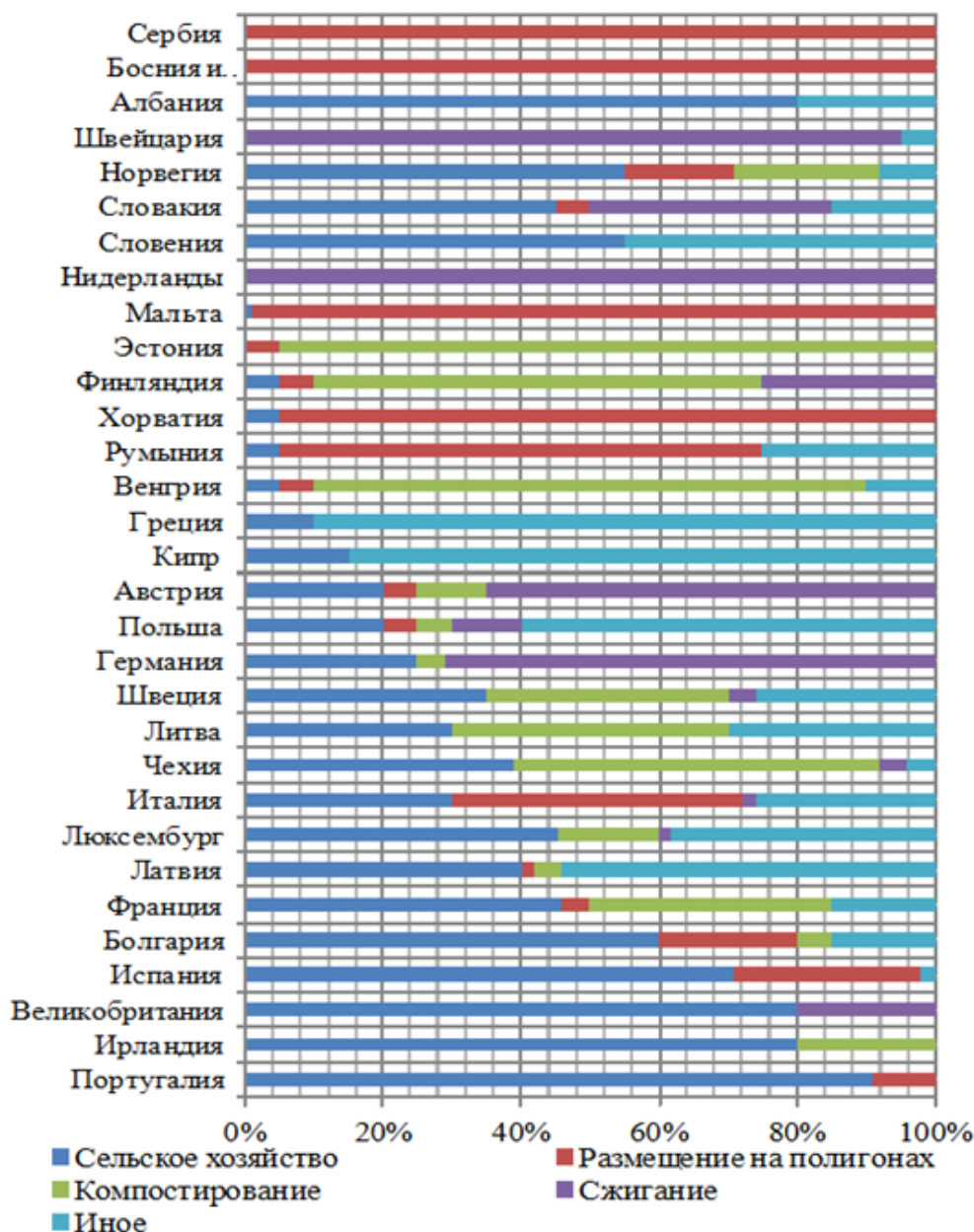


Рисунок 2 – Обращение с иловыми осадками городских очистных сооружений в странах Европы по состоянию на 2015 г.⁵ [3]

Figure 2 – Sludge management of urban wastewater treatment plants in European countries as of 2015 [3]

⁵Key figures on Europe. 2017 edition. Statistical books [Electronic resource] / ed.: H. Strandell, P. Wolf; Eurostat. 177 p. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/8309812/KS-EI-17-001-ENN.pdf/b7df53f5-4faf-48a6-aca1-c650d40c9239> (date of access: 22.02.2023).

Наибольшее распространение использование ОСВ в качестве удобрения в сельском хозяйстве получило в Португалии, Ирландии и Великобритании. А, например, в Германии, Швейцарии и Нидерландах прогрессирует сжигание ОСВ с последующим их размещением на полигонах либо применение в качестве добавки к строительным материалам и в других направлениях. Напротив, в небольших и менее технологичных странах практикуется размещение ОСВ на полигонах. При этом популярность того или иного метода зависит от национальной нормативно-правовой базы, обеспечивающей условия обращения с ОСВ, и от государственного субсидирования этой области.

Для стимулирования переработки ОСВ во вторичный ресурс, в частности производства биогаза посредством анаэробного сбраживания ОСВ, во многих странах Европы предоставляют налоговые льготы. Так, в Дании на этих условиях действует 18 биогазовых заводов [6].

В странах Азии также прослеживается популярность различных способов утилизации в зависимости от региона. Так, в Японии чаще всего ОСВ используют для получения биогаза, в стране более 15 % станций канализационной очистки снабжены резервуарами для сбраживания (рисунок 3) [24].



**Рисунок 3 – Резервуары для сбраживания
на биогазовой экостанции в Кобе [24]**

Figure 3 – Tanks for digestion at a biogas eco-station in Kobe [24]

Другой пример использования ОСВ в Японии также имеет высокий практический интерес. Так, центр мелиорации воды Сунамати (округ Кото), который является одним из 13 центров очистки сточных вод в 23 округах столичного Токио, в ноябре 2007 г. на своем шламовом заводе в Тобу начал эксплуатацию установки карбонизации осадка проектной мощностью 300 т в день. ОСВ, который раньше сжигался и складировался на свалках, теперь карбонизируется и газифицируется в топливо из биомассы, после чего транспортируется на электростанцию Накосо в Joban Joint Power Co (в Иваки, префектура Фукусима), где топливо смешивается с углем в количестве около 1 % угля и полученная смесь сжигается в генераторной установке № 7 (мощностью 250000 кВт). Теплотворная способность твердого топлива, изготовленного из ОСВ, сравнима с теплотворной способностью низкокачественного угля. Ежегодно на шламовом заводе перерабатывается до 99000 т обезвоженного осадка, в результате чего получается 8700 т твердого топлива [25].

В Южной Корее наиболее активно развивается направление использования ОСВ в целях получения биотоплива (бионефти и биогаза), здесь задействовано более 22 % ОСВ. Порядка 16 % ОСВ сжигается на специализированных заводах. Тем не менее до настоящего времени большая часть (около 37 %) осадков передается на условиях внешней консигнации⁶ [26].

В КНР около 30 % ОСВ используется в качестве удобрений, 26,7 % сжигается в специальных установках, остальное складировается в отвалы [6].

В США около 55 % образующегося осадка вносят в почву для агротехнических целей и рекультивации земель, оставшиеся 45 % частично размещаются на полигонах твердых бытовых отходов, а частично утилизируются на мусоросжигательных заводах или компостируются в специальных установках для получения грунтов [27].

⁶Условия внешней консигнации предполагают размещение отхода на складах внешних (иностраных) партнеров для дальнейшей реализации.

В большей части стран Африки (за исключением Южной Африки) обращению с ОСВ уделяется мало внимания из-за отсутствия во многих местностях сооружений очистки сточных вод, а также отсутствия правовых норм регулирования [27].

В России в качестве удобрений из общего объема ОСВ используется не более 5–7 %, большая часть складывается на иловых площадках и в шламонакопителях, где происходит их стабилизация в естественных климатических условиях [21], в ряде регионов нашей страны ОСВ сжигаются на заводах сжигания отходов, после чего, как правило, размещаются на полигонах [28].

Сжигание ОСВ имеет высокую популярность, так как позволяет избежать отчуждения большого количества площадей для их размещения, а также экологических проблем на близлежащих территориях. Однако метод также имеет не лучшие экологические показатели, так как при сжигании происходит выделение в атмосферу продуктов горения, эмиссия загрязняющих веществ из ОСВ в отходящие газы, а такие химические элементы, как ртуть, мышьяк и селен, могут проходить через систему очистки продуктов сгорания без задержки в достаточно большом количестве [29], что предполагает дополнительные затраты на доочистку продуктов горения. Образовавшиеся зольные остатки имеют более высокие концентрации некоторых веществ, определяемых в составе ОСВ, например тяжелых металлов, что необходимо учитывать при их дальнейшем размещении или использовании. Помимо этого, требуется предварительная подготовка осадков перед процессом подачи на сжигание, которая определяется типом печи и применяемой технологией сжигания [29].

Анаэробное (без доступа кислорода) сбраживание ОСВ интересно в плане получения биоэнергетических ресурсов, но требует специального крупногабаритного оборудования и энергозатрат на поддержание рабочих характеристик процесса (пример на рисунке 3).

Аэробное сбраживание (компостирование) является эффективным способом утилизации, однако имеет также определенные проблемы. Так, активная фаза компостирования открытым способом в грядах или статических кучах в климатических условиях России может осуществляться не более семи месяцев в году (в южных регионах), что увеличивает сроки получения продукционной смеси. Помимо этого, необходимо выделение дренируемых площадей с твердым покрытием для размещения компостируемой массы и оборудования для введения структурирующей органики в состав ОСВ и осуществления буртования и ворошения. За рубежом разработан аналогичный процесс, лишенный указанных проблем, автотермичное термофильное аэробное сбраживание (ATAD – Autothermal thermophilic aerobic digestion) [30]. Этот процесс отличается тем, что компостирование осуществляется в закрытых биореакторах с принудительной механической аэрацией посредством подачи сжатого воздуха, это делает его также более затратным.

Особый интерес для многих стран Европы и Азии вызывает разработка технологий извлечения фосфора из золы ОСВ из-за высокого спроса на него в сельскохозяйственном производстве. Страны ЕС практически полностью зависимы от импорта фосфорных удобрений (91 %) [4]. Однако извлечение фосфора из золы ОСВ является дорогостоящим процессом: получение 1 кг гидроксиапатита ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) из золы ОСВ обходится в 32 долл. США, в то время как производство 1 кг гидроксиапатита из фосфатной руды обходится всего в $(1,0 \pm 0,3)$ долл. США [31]. Такой вариант требует крупных инвестиций и приведет к удорожанию сельскохозяйственной продукции.

Исходя из приведенных данных и характеристик различных способов утилизации ОСВ, наиболее простым и наименее затратным является использование ОСВ в сельскохозяйственном производстве для улучшения почв и в целях рекультивации нарушенных земель.

Выводы. Утилизация ОСВ и обращение с ними имеют высокую актуальность у нас в стране и за рубежом. В мировом сообществе были разработаны различные способы утилизации таких отходов: применение их в качестве удобрений в сельском хозяйстве, в качестве изолирующего материала для технической рекультивации, для получения биогрунтов, сжигание с последующим размещением на полигонах либо с последующим извлечением фосфора из полученной золы, получение биотоплива (пеллет, биодизеля и биогаза).

Наиболее интересным способом утилизации ОСВ, с нашей точки зрения, является извлечение из него фосфора и энергии (получение биотоплива), как и наиболее затратным. С одной стороны, эти способы демонстрируют высокие экологические показатели, с другой стороны, их экономический эффект по совокупности незначителен, что делает их малопопулярными для многих стран.

Наиболее простым и наиболее экономически эффективным способом является использование ОСВ в качестве удобрительных смесей в сельском хозяйстве. Однако данный способ должен сопровождаться серьезным экологическим обоснованием и мониторингом.

Список источников

1. Валиев В. С., Иванов Д. В., Шагидуллин Р. Р. Способы утилизации осадков городских сточных вод (обзор) // Российский журнал прикладной экологии. 2020. № 4(24). С. 52–63. DOI: 10.24411/2411-7374-2020-10034.
2. Биотехнология и микробиология анаэробной переработки органических коммунальных отходов: коллектив. моногр. / общ. ред. и сост. А. Н. Ножевниковой, А. Ю. Каллистова, Ю. В. Литти, М. В. Кевбрина. М.: Унив. кн., 2016. 320 с.
3. Тихонова И. О. Утилизация иловых осадков в экономике замкнутого цикла: опыт Германии // Экология производства. 2020. № 6. С. 74–77.
4. Тенно Т. Рекуперация фосфора из осадка сточных вод [Электронный ресурс]. 2021. URL: <https://www.good-climate.com/materials/files/219.pdf> (дата обращения: 22.02.2023).
5. Паллета решений по рециклингу биогенов в регионе Балтийского моря / М. Раудкиви, Т. Тенно, М. Андреева, Д. Франк-Каменецкий, Л. Герман, Аг. Илола, С. Реттиг, К. Рийко, К. Росквист; BSR Water. 2021. 82 с.
6. Васильев В. С., Иванов Д. В., Шагидуллин Р. Р. Анализ мирового опыта утилизации осадка городских сточных вод // Российский журнал прикладной экологии. 2020. № 4. С. 43–51. DOI: 10.24411/2411-7374-2020-10033.

7. Крупнова Т. Г., Кострюкова А. М., Машкова И. В. Обзор современных технологий обработки осадков городских сточных вод // *Сельское, лесное и водное хозяйство* [Электронный ресурс]. 2014. № 7. URL: <https://agro.snauka.ru/2014/07/1549> (дата обращения: 25.02.2023).

8. Новикова О. К. *Обработка осадков сточных вод: учеб.-метод. пособие / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. Гомель: БелГУТ, 2015. 96 с.*

9. Zhang X., Wang X.-q., Wang D.-f. Immobilization of heavy metals in sewage sludge during land application process in China // *Sustainability*. 2020. Vol. 9, iss. 11. <https://doi.org/10.3390/su9112020>.

10. Rizzardini C. B., Goi D. Sustainability of domestic sewage sludge disposal // *Sustainability*. 2014. Vol. 6, № 5. P. 2424–2434. <https://doi.org/10.3390/su6052424>.

11. Sewage sludge composting: quality assessment for agricultural application / A. H. Nafez, M. Nikaen, S. Kadkhodaie, M. Hatamzadeh, S. Moghim // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2015. Vol. 187. 709. DOI: 10.1007/s10661-015-4940-5.

12. Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors / P. Alvarenga, C. Mourinha, M. Farto, T. Santos, P. Palma, J. Sengo, M.-C. Morais, C. Cunha-Queda // *Waste Management*. 2015. Vol. 40. P. 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.027>.

13. Walter I., Martinez F., Cala V. Heavy metal speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses // *Environmental Pollution*. 2006. Vol. 139, iss. 3. P. 507–514. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.05.020>.

14. Concentration of Cu, Zn, Cr, Ni, Cd, and Pb in soil, sugarcane leaf and juice: residual effect of sewage sludge and organic compost application / S. M. Moretti, E. I. Bertocini, A. C. Vitti, L. R. Alleoni, C. H. Abreu-Junior // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2016. Vol. 188. 163. DOI: 10.1007/s10661-016-5170-1.

15. Immobilization of some metals in contaminated sludge by zeolite prepared from local materials / A. M. Ashmawy, H. S. Ibrahim, S. M. A. Moniem, T. S. Saleh // *Toxicological and Environmental Chemistry*. 2012. Vol. 94, № 9. P. 1657–1669. DOI: 10.1080/02772248.2012.727819.

16. Investigation of potentially toxic heavy metals in different organic wastes used to fertilize market garden crops / M. Tella, E. Doelsch, P. Letourmy, S. Chataing, F. Cuoq, M. N. Bravin, H. Saint Macary // *Waste Management*. 2013. Vol. 33, № 1. P. 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.07.021>.

17. Direct and residual effect of sewage sludge on yield, heavy metals content and soil fertility under rice–wheat system / A. M. Latare, O. Kumar, S. K. Singh, A. Gupta // *Ecological Engineering*. 2014. Vol. 69. P. 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.066>.

18. Current status and developing trends of the contents of heavy metals in sewage sludges in China / J. Yang, M. Lei, T. Chen, D. Gao, G. Zheng, G. Guo, D. Lee // *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. 2014. Vol. 8. P. 719–728. <https://doi.org/10.1007/s11783-013-0600-6>.

19. Roskosch A., Heidecke P. *Klärschlammentsorgung in der Bundesrepublik Deutschland* [Elektronische Ressource]. Berlin: Atelier Hauer + Dörfler GmbH, 2018. 104 s. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2018_10_08_uba_fb_klaerschamm_bf_low.pdf (Datum der Bewerbung: 22.02.2023).

20. Агроекологічна характеристика осадів стічних вод м. Харкова / Є. В. Скрильник, Н. В. Максименко, Я. С. Рижкова, В. А. Рижков // *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2018. № 1–2(29). С. 112–118. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2018-29-12>.

21. Агрохимические, санитарно-эпидемиологические и токсикологические исследования ОСВ и компостов очистных сооружений г. Москвы, устойчивость функциониро-

вания в агроэкосистемах / Е. П. Пахненко, Е. А. Гунина, Г. Е. Мерзлая, Н. В. Костина // Почвы в биосфере: сб. материалов Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 50-летию Ин-та почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, 10–14 сент. 2018 г. Томск: Нац. исслед. Том. гос. ун-т, 2018. Ч. 1. С. 359–363.

22. Дрозд Г. Я., Бреус Р. В. Решение проблем утилизации городских отходов водоочистки // Коммунальное хозяйство городов. 2005. № 63. С. 130–136.

23. Никовская Г. Н., Калининченко К. В. Биотехнология утилизации осадков муниципальных сточных вод // *Biotechnologia Acta*. 2014. Vol. 7, № 3. С. 21–32.

24. Sanitation and Sustainable Development in Japan. Mandaluyong City, Philippines: Asian Development Bank, 2016. 54 p.

25. Koshiba K. Japanese municipalities targeting energy self-sufficiency at sewage treatment plants [Electronic resource] // *JFS Newsletter*. 2008, July. № 71. URL: https://japanfs.org/en/news/archives/news_id027853.html (date of access: 22.02.2023).

26. Lofgren K. South Korean researchers create clean biodiesel from sewage sludge [Electronic resource]. 2012. URL: <https://inhabitat.com/south-korean-researchers-create-clean-biodiesel-from-sewage-sludge/> (date of access: 22.02.2023).

27. Sustainable sewage sludge management: from current practices to emerging nutrient recovery technologies / S. Shaddel, H. Bakhtary-Davijany, C. Kabbe, F. Dadgar, S. W. Østerhus // *Sustainability*. 2019. Vol. 11, iss. 2. P. 34–35. DOI: 10.3390/su11123435.

28. Опыт развития объектов водоотведения ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»: опыт перехода к наилучшим доступным технологиям / С. Н. Волков, О. Н. Рублевская, И. О. Тихонова, Т. В. Гусева, М. Иикканен // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2020. № 6. С. 104–120. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-6-6.

29. Янин Е. П. Сжигание осадков городских сточных вод (проблемы и способы) // *Ресурсосберегающие технологии: экспресс-информация: межотраслевой вып.* / ВИНТИ РАН. 2006. № 24. С. 3–30.

30. Application of autothermal thermophilic aerobic digestion as a sustainable recycling process of organic liquid waste: Recent advances and prospects / M. Zhang, Y. Tashiro, N. Ishida, K. Sakai // *Science of the Total Environment*. 2022, July 1. Vol. 828. 154187. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154187.

31. Comprehensive recycling of fresh municipal sewage sludge to fertilize garden plants and achieve low carbon emission: A pilot study / X. Lin, C. Chen, H. Li, L. Hei, L. Zeng, Z. Wei, Y. Chen, Q.-T. Wu // *Frontiers in Environmental Science*. 2022. Vol. 10. 1023356. DOI: 10.3389/fenvs.2022.1023356.

References

1. Valiev V.S., Ivanov D.V., Shagidullin R.R., 2020. *Sposoby utilizatsii osadkov gorodskikh stochnykh vod (obzor)* [Methods for urban wastewater sludge disposal (review)]. *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii* [Russian Journal of Applied Ecology], no. 4(24), pp. 52-63, DOI: 10.24411/2411-7374-2020-10034. (In Russian).

2. Nozhevnikov A.N., Kallistov A.Yu., Litt Yu.V., Kevbrin M.V., 2016. *Biotehnologiya i mikrobiologiya anaerobnoy pererabotki organicheskikh kommunal'nykh otkhodov: kollektiv. monogr.* [Biotechnology and Microbiology of Anaerobic Processing of Organic Municipal Waste: collective monograph]. Moscow, University Book Publ., 320 p. (In Russian).

3. Tikhonova I.O., 2020. *Utilizatsiya ilovykh osadkov v ekonomike zamknutogo tsikla: opyt Germanii* [Utilization of sludge in the circular closed economy: the experience of Germany]. *Ekologiya proizvodstva* [Ecology of Production], no. 6, pp. 74-77. (In Russian).

4. Tenno T., 2021. *Rekuperatsiya fosfora iz osadka stochnykh vod* [Phosphorus recovery from sewage sludge], available: <https://www.good-climate.com/materials/files/219.pdf> [accessed 22.02.2023]. (In Russian).

5. Raudkivi M., Tenno T., Andreeva M., Frank-Kamenetsky D., German L., Ilola Ag., Rettig S., Rijko K., Rosquist K., 2021. *Palleta resheniy po retsiklingu biogenov v regione Baltiyskogo morya* [Pallet of Nutrient Recycling Solutions in the Baltic Sea Region]. BSR Water, 82 p. (In Russian).

6. Vasiliev V.S., Ivanov D.V., Shagidullin R.R., 2020. *Analiz mirovogo opyta utilizatsii osadka gorodskikh stochnykh vod* [Analysis of world experience in urban wastewater sediment disposal]. *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii* [Russian Journal of Applied Ecology], no. 4, pp. 43-51, DOI: 10.24411/2411-7374-2020-10033. (In Russian).

7. Krupnova T.G., Kostryukova A.M., Mashkova I.V., 2014. *Obzor sovremennykh tekhnologiy obrabotki osadkov gorodskikh stochnykh vod* [Review of modern treatment technologies of urban sewage sludge]. *Sel'skoe, lesnoe i vodnoe khozyaystvo* [Agriculture, Forestry and Water Management], no. 7, available: <https://agro.snauka.ru/2014/07/1549> [accessed 25.02.2023]. (In Russian).

8. Novikova O.K., 2015. *Obrabotka osadkov stochnykh vod: uchebnoe posobie* [Processing of Sewage Sludge: textbook]. Ministry of Transport and Communications of Republic Belarus, Belorussian State University of Transport, Gomel, BelSUT, 96 p. (In Russian).

9. Zhang X., Wang X.-q., Wang D.-f., 2020. Immobilization of heavy metals in sewage sludge during land application process in China. *Sustainability*, vol. 9, iss. 11, <https://doi.org/10.3390/su9112020>.

10. Rizzardini C.B., Goi D., 2014. Sustainability of domestic sewage sludge disposal. *Sustainability*, vol. 6, no. 5, pp. 2424-2434, <https://doi.org/10.3390/su6052424>.

11. Nafez A.H., Nikaeen M., Kadkhodaie S., Hatamzadeh M., Moghim S., 2015. Sewage sludge composting: quality assessment for agricultural application. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 187, 709, DOI: 10.1007/s10661-015-4940-5.

12. Alvarenga P., Mourinha C., Farto M., Santos T., Palma P., Sengo J., Morais M.-C., Cunha-Queda C., 2015. Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors. *Waste Management*, vol. 40, pp. 44-52, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.027>.

13. Walter I., Martinez F., Cala V., 2006. Heavy metal speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses. *Environmental Pollution*, vol. 139, iss. 3, pp. 507-514, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.05.020>.

14. Moretti S.M., Bertoncini E.I., Vitti A.C., Alleoni L.R., Abreu-Junior C.H., 2016. Concentration of Cu, Zn, Cr, Ni, Cd, and Pb in soil, sugarcane leaf and juice: residual effect of sewage sludge and organic compost application. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 188, 163, DOI: 10.1007/s10661-016-5170-1.

15. Ashmawy A.M., Ibrahim H.S., Moniem S.M.A., Saleh T.S., 2012. Immobilization of some metals in contaminated sludge by zeolite prepared from local materials. *Toxicological and Environmental Chemistry*, vol. 94, no. 9, pp. 1657-1669, DOI: 10.1080/02772248.2012.727819.

16. Tella M., Doelsch E., Letourmy P., Chataing S., Cuoq F., Bravin M.N., Saint Macary H., 2013. Investigation of potentially toxic heavy metals in different organic wastes used to fertilize market garden crops. *Waste Management*, vol. 33, no. 1, pp. 184-192, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.07.021>.

17. Latore A.M., Kumar O., Singh S.K., Gupta A., 2014. Direct and residual effect of sewage sludge on yield, heavy metals content and soil fertility under rice–wheat system. *Ecological Engineering*, vol. 69, pp. 17-24, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.066>.

18. Yang J., Lei M., Chen T., Gao D., Zheng G., Guo G., Lee D., 2014. Current status and developing trends of the contents of heavy metals in sewage sludges in China. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, vol. 8, pp. 719-728, <https://doi.org/10.1007/s11783-013-0600-6>.

19. Roskosch A., Heidecke P., 2018. Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Berlin: Atelier Hauer + Dörfler GmbH, 104 p. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2018_10_08_u_ba_fb_klaerschamm_bf_low.pdf [Datum der Bewerbung 22.02.2023]. (In German).

20. Skrylnyk Ye. V. Agroecological Characterization of Sewage Sludge of Kharkov / Ye. V. Skrylnyk, N. V. Maksymenko, Ya. S. Ryzhkova, V. A. Ryzhkov // Man and environment. Issues of neocology, V. 29, No. 1-2, 2018., pp. 112–118. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2018-29-12>. (In Ukrainian).

21. Pakhnenko E.P., Gunina E.A., Merzlaya G.E., Kostina N.V., 2018. *Agrokhimicheskie, sanitarno-epidemiologicheskie i toksikologicheskie issledovaniya OSV i kompostov ochistnykh sooruzheniy g. Moskvy, ustoychivost' funkcionirovaniya v agroekosistemakh* [Agrochemical, sanitary-epidemiological and toxicological studies of WWS and composts from wastewater treatment plants in Moscow, sustainability of functioning in agroecosystems]. *Pochvy v biosfere: sb. materialov Vseros. nauch. konf. s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 50-letiyu Instituta pochvovedeniya i agrokhimii SO RAN* [Soils in the Biosphere: Proc. of All-Russian Scientific Conf. with International Participation, Dedicated to the 50th Anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences]. Tomsk, National Research State University, 2018, pt. 1, pp. 359-363. (In Russian).

22. Drozd G.Ya., Breus R.V., 2005. *Reshenie problem utilizatsii gorodskikh otkhodov vodoочистки* [Solving the problems of recycling urban waste water treatment]. *Kommunal'noe khozyaystvo gorodov* [Communal Services of Cities], no. 63, pp. 130-136. (In Russian).

23. Nikovskaya G.N., Kalinichenko K.V., 2014. *Biotekhnologiya utilizatsii osadkov munitsipal'nykh stochnykh vod* [Biotechnology of utilization of municipal wastewater sediments]. *Biotechnologia Acta*, vol. 7, no. 3, pp. 21-32. (In Russian).

24. Sanitation and Sustainable Development in Japan. Mandaluyong City, Philippines, Asian Development Bank, 2016, 54 p.

25. Koshiba K., 2008. Japanese municipalities targeting energy self-sufficiency at sewage treatment plants. JFS Newsletter, July, no. 71, available: https://japanfs.org/en/news/archives/news_id027853.html [accessed 22.02.2023].

26. Lofgren K., 2012. South Korean researchers create clean biodiesel from sewage sludge, available: <https://inhabitat.com/south-korean-researchers-create-clean-biodiesel-from-sewage-sludge/> [accessed 22.02.2023].

27. Shaddel S., Bakhtiary-Davijany H., Kabbe C., Dadgar F., Østerhus S.W., 2019. Sustainable sewage sludge management: from current practices to emerging nutrient recovery technologies. *Sustainability*, vol. 11, iss. 2, pp. 34-35, DOI: 10.3390/su11123435.

28. Volkov S.N., Rublevskaya O.N., Tikhonova I.O., Guseva T.V., Iikkanen M., 2020. *Opyt razvitiya ob"ektov vodootvedeniya GUP "Vodokanal Sankt-Peterburga": opyt perekhoda k nailuchshim dostupnym tekhnologiyam* ["St. Petersburg vodokanal" experience in developing water disposal facilities as the steps towards transition to the best available techniques]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management], no. 6, pp. 104-120, DOI: 10.35567/1999-4508-2020-6-6. (In Russian).

29. Yanin E.P., 2006. *Szhiganie osadkov gorodskikh stochnykh vod (problemy i sposoby)* [Incineration of urban sewage sludge (problems and methods)]. *Resursosberegayushchie tekhnologii: ekspress-informatsiya: mezhotraslevoy vypusk* [Resource-Saving Technologies: Express Information: Interbranch Issue]. VINITI RAN, no. 24, pp. 3-30. (In Russian).

30. Zhang M., Tashiro Y., Ishida N., Sakai K., 2022. Application of autothermal thermophilic aerobic digestion as a sustainable recycling process of organic liquid waste: Recent advances and prospects. *Science of the Total Environment*, July 1, vol. 828, 154187, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154187.

31. Lin X., Chen C., Li H., Hei L., Zeng L., Wei Z., Chen Y., Wu Q.-T., 2022. Comprehensive recycling of fresh municipal sewage sludge to fertilize garden plants and achieve low carbon emission: A pilot study. *Frontiers in Environmental Science*, vol. 10, 1023356, DOI: 10.3389/fenvs.2022.1023356.

Информация об авторе

С. А. Манжина – старший научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент.

Information about the author

S. A. Manzhina – Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

Автор несет ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

The author is responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.03.2023; одобрена после рецензирования 13.03.2023; принята к публикации 15.03.2023.

The article was submitted 03.03.2023; approved after reviewing 13.03.2023; accepted for publication 15.03.2023.