

Е. А. Флюрик, А. А. Масехнович*Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь,
e-mail: FlurikE@mail.ru, al.masekhnovich@mail.ru***ФИТОТЕСТИРОВАНИЕ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД**

Аннотация. Дана оценка возможности использования иловых осадков сточных вод (ОСВ), взятых из иловой камеры Минской очистной станции, в качестве нетрадиционного органоминерального удобрения. Необходимость учитывать степень опасности загрязнения ОСВ тяжелыми металлами является важным аспектом при выборе способа его использования. Для оценки уровня загрязненности иловых осадков использовали биологическую экспресс-диагностику – фитотестирование. В качестве тест-объектов выбраны однодольное растение ячмень и двудольное – кресс-салат. Определены основные показатели роста и развития растений: всхожесть семян, длина наземной части и биомасса растения, длина и развитость корневой системы. Полученные результаты указывают на некоторое угнетающее действие от использования не обработанных иловых осадков на важнейшие показатели роста и развития растения. Однако результаты элементного анализа золы иловых ОСВ и наземной части тест-объектов, выращенных на почве с дозами осадков 4 и 8 т ОСВ/га, показали, что накопления тяжелых металлов в биомассе тест-объектов не происходит. Полученные данные свидетельствуют о возможности использования ОСВ в процессе сельскохозяйственной деятельности. Предполагаемый результат разработки – органоминеральная почвосмесь на основе иловых ОСВ.

Ключевые слова: осадки сточных вод, фитотестирование, токсичность, элементный состав, органоминеральное удобрение

A. A. Flyurik, A. A. Masekhnovich*Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus,
e-mail: FlurikE@mail.ru, al.masekhnovich@mail.ru***PHYTOTESTING OF SEWAGE SLUDGE**

Abstract. The article assesses the possibility of using sewage sludge from the sludge chamber of the Minsk wastewater treatment plant as an unconventional organomineral fertilizer. It is necessary to take into account the degree of contamination of sewage sludge for their further effective use. To assess the level of contamination of silt sediments, we used biological rapid diagnostics-phytotesting. The monocotyledonous plant *Hordeum vulgare* and the dicotyledonous plant *Lepidium sativum* were selected as test objects. The main indicators of plant growth and development were determined: germinating capacity, the length of the ground part of the plant and its biomass, the length and development of the root system. Germinating capacity in the experimental samples decreased by an average of 20 % compared to the control sample. Indicators such as the length and development of the plant's root system and its biomass are suppressed when using sewage sludge as fertilizer. The results obtained may be related to exposure to toxic substances contained in sewage sludge. Sewage sludge contains heavy metals such as Mn (0,58 %), Fe (13,74 %), Cu (1,27 %), Zn (3,22 %), As (0,08 %). However, the results of the elemental analysis of the ash of sewage sludge and the ground part of the test objects grown on the soil with precipitation doses of 4 and 8 t / ha showed that the accumulation of heavy metals in the biomass of the test objects does not occur. At doses of 4 and 8 t/ha of sewage sludge, there is a slight accumulation of zinc and copper in the ground part of the watercress; the accumulation of heavy metals in the biomass of barley is not observed.

Keywords: sewage sludge, phytotesting, toxicity, elemental composition, organomineral fertilizer

А. А. Флюрык, А. А. Масяхновіч*Беларускі дзяржаўны тэхналагічны ўніверсітэт, Мінск, Беларусь,
e-mail: FlurikE@mail.ru, al.masekhnovich@mail.ru***ФІТАТЭСЦІРАВАННЕ АПАДКАЎ СЦЁКАВЫХ ВОД**

Анатацыя. Дадзена ацэнка магчымасці выкарыстання глеістых ападкаў сцёкавых вод (АСВ), узятых з глеістай камеры Мінскай ачышчальнай станцыі, у якасці нетрадыцыйнага арганамінеральнага ўгнаення. Неабходнасць улічваць ступень небяспекі забруджвання АСВ цяжкімі металамі з'яўляецца важным аспектам пры выбары спосабу яго выкарыстання. Для ацэнкі ўзроўню забруджанасці глеістых ападкаў выкарыстоўвалі біялагічную экспрэс-дыягностыку – фітатэсціраванне. У якасці тэст-аб'ектаў выбраны: аднадольная расліна ячмень і двухдольная – крэс-салата. Вызначаны асноўныя паказчыкі росту і развіцця раслін: усходжасць насення, даўжыня наземнай часткі і біямаса расліны, даўжыня і развіцасць каранёвай сістэмы. Атрыманыя вынікі паказваюць на некаторае прыгнятальнае дзеянне ад выкарыстання не апрацаваных глеістых ападкаў на найважнейшыя паказчыкі росту і развіцця расліны. Аднак вынікі элементнага аналізу попелу глеістых АСВ і наземнай часткі тэст-аб'ектаў, вырашчаных на глебе з дозамі ападкаў 4 і 8 т АСВ/га, паказалі, што назапашвання цяжкіх металаў у біямасе тэст-аб'ектаў не адбываецца. Атрыманыя дадзеныя сведчаць аб магчымасці выкарыстання АСВ у працэсе сельскагаспадарчай дзейнасці. Меркаваны вынік распрацоўкі – арганамінеральная глебасумесь на аснове глеістых АСВ.

Ключавыя словы: ападкі сцёкавых вод, фітатэсціраванне, таксічнасць, элементны склад, арганамінеральнае ўгнаенне

Введение. Поиск методов утилизации образующихся на очистных сооружениях осадков сточных вод (ОСВ) коммунальных и промышленных производств не теряет своей актуальности, а в последние годы приобретает статус глобальной эколого-биотехнологической задачи. До сих пор один из самых распространенных методов утилизации ОСВ – это их складирование (депонирование) [1, 2]. Однако объем, образующихся ОСВ огромен, поэтому дальнейшая переработка с целью получения безопасного и полезного продукта является важной задачей.

В настоящее время в литературе можно встретить различные технологические решения по утилизации ОСВ, например, в работах [2, 3] предложено их использовать в строительной и дорожно-строительной отраслях, в [1, 4, 5] – для сельскохозяйственных нужд (вермокомпостирование или в качестве удобрения), в [1, 6] – описан способ сжигания ОСВ, что позволяет уменьшить объем осадка в 12 раз и использовать его в дальнейшем в качестве топлива или удобрения.

ОСВ – это многокомпонентная система, характеризующаяся комплексным содержанием биогенных макро- и микроэлементов, которые необходимы для роста и развития растения и повышения плодородия почв. Высокая удобрительная ценность осадков обуславливает возможность их использования как в чистом виде, так и в качестве улучшающих добавок к традиционным органическим удобрениям (различным видам навоза, компостов и др.). Актуальным также является добавление ОСВ к подстилочному навозу для компенсации потерь азота при его хранении [7].

В связи с высокой стоимостью минеральных азотных и фосфорных удобрений в почву поступает недостаточное количество макроэлементов, что приводит к их деградации [8]. Поэтому использование ОСВ в качестве нетрадиционного органоминерального удобрения является весьма актуальным и перспективным методом их утилизации. Согласно литературным данным [9–12], применение ОСВ в качестве удобрения способствует повышению урожайности многолетних трав, ячменя, овса, озимой пшеницы. Особенно актуально, как показали исследования, внесение ОСВ под кормовые культуры [8].

Однако ОСВ – это один из основных загрязнителей окружающей среды [1, 13]. Осадки заражены яйцами гельминтов и патогенными микроорганизмами, в них могут содержаться тяжелые металлы (ТМ), избыточное количество нитратов, поверхностно-активные вещества, нефтепродукты, оказывающие негативное влияние на организм человека и окружающую среду. Опасность представляют также газы, выделяющиеся из осадков, превышающие в несколько раз предельно допустимые концентрации (ПДК) и имеющие сильный, неприятный запах [14]. Из-за высокого содержания ТМ в ОСВ чаще всего их относят к IV классу опасности (малоопасный). Поэтому применение ОСВ в качестве удобрений требует обязательного постоянного контроля их химической и биологической безопасности [15].

Возрастающее разнообразие загрязняющих веществ и их источников обусловило активное внедрение методов фитотестирования в экологическое почвоведение. В условиях, когда загрязнение окружающей среды приобретает комплексный характер, количественные показатели содержания загрязняющих веществ, такие как ПДК, предельно допустимый уровень (ПДУ), не могут охватить многообразия поллютантов и оценить экологический риск для исследуемых объектов. Общее экотоксикологическое состояние почвенных экосистем можно оценить интегральными методами биотестирования, в частности по реакции высших растений [16].

Основу метода фитотестирования составляет способность растений реагировать на изменение условий среды, что позволяет оценивать токсичность или биоактивность различных веществ. Чувствительность растений к внешним воздействиям проявляется в изменении биохимических реакций и отражается в морфологических параметрах роста и развития. Принцип метода фитотестирования заключается в регистрации данных параметров у растительных организмов, развивающихся в испытуемых пробах по сравнению с контрольными вариантами, не содержащими тестируемых веществ. Фитотест информативен, высокочувствителен и характеризуется стабильностью получаемых результатов [17].

Цель работы – проверка возможности использования иловых ОСВ Минской очистной станции в качестве органоминерального удобрения без предварительной обработки.

В качестве объекта исследования служили образцы иловых ОСВ, взятые из иловой камеры Минской очистной станции (МОС-1); пробы отобраны в осенний период 2020 г. Предмет исследования – перспективы использования иловых ОСВ в качестве полезного компонента. В связи с непрерывным увеличением объемов данного отхода на иловых площадках и невозможностью увеличивать площади, отводимые под хранение отхода, решение вопроса утилизации иловых ОСВ обуславливает актуальность исследований.

Методы исследований. Работа выполнена с использованием современных методов, а также применялся системный метод анализа исследуемой темы, включающий патентно-информационный поиск и лабораторные методы исследования. Работа выполнялась на базе кафедры биотехнологии Белорусского государственного технологического университета.

Фитотестирование проводили в соответствии с ГОСТ 12 038-84. Для оценки уровня фитотоксичности в качестве тест-культур были выбраны однодольное растение ячмень (*Hordeum vulgare*) и двудольное – кресс-салат (*Lepidium sativum*). Семена прошли лабораторный контроль качества на всхожесть, чистоту сорта и соответствуют СТБ 2145-2010. Дозы внесения иловых ОСВ составили 4 и 8 т/га. Данные значения были выбраны исходя из рекомендаций, изложенных в [18]. Продолжительность эксперимента составила 6 сут. Семена проращивали в пластиковых контейнерах размером $d = 33,2 \text{ см}^2$, $h = 10 \text{ см}$ (кресс-салат) и $d = 63,6 \text{ см}^2$, $h = 14 \text{ см}$ (ячмень) с массой исходной почвы в каждом образце 75 г (кресс-салат) и 225 г (ячмень) при комнатной температуре. В контейнеры вносили 20 семян кресс-салата и 10 семян ячменя соответственно. Для поддержания постоянной влажности производили полив каждые два дня (объем воды 50–70 см³). Все опыты проводили в 3-кратной повторности. Статистическую обработку полученных данных осуществляли с использованием программы Microsoft Office Excel 2007.

Результаты и их обсуждение. Первые всходы семян отмечены на третьи сутки. Зависимость показателей роста кресс-салата от дозы иловых ОСВ в почве определяли на пятые сутки после посадки, а ячменя – на шестые.

Внесение осадков в качестве удобрения в почву привело к угнетению всхожести в первые дни эксперимента, но к концу эксперимента основные показатели роста и развития растений, выросших на почве с иловыми ОСВ, приблизились к контролю. В результате по окончании эксперимента не было различий в длине надземной части в контроле и рассматриваемых вариантах опыта (рис. 1).

На шестые сутки роста определяли итоговую всхожесть (B , %) семян тест-объектов. Динамика всхожести семян представлена на рис. 2, а, б. Как видно из рис. 2, использование иловых ОСВ в качестве биоудобрения снижает всхожесть семян.

На пятые сутки проращивания семян кресс-салата определяли длину проростка и корневой системы, а также массу наземной части. Полученные данные представлены на рис. 3. Как видно из рис. 3, использование иловых ОСВ в качестве удобрения при выращивании кресс-салата оказывает негативное влияние на такие характеристики, как длина корня и биомасса наземной части растения. В литературе указывается [19], что наиболее токсикочувствительным пара-



Рис. 1. Образцы тест-объектов:

а – кресс-салат, пятые сутки культивирования; б – ячмень, шестые сутки культивирования

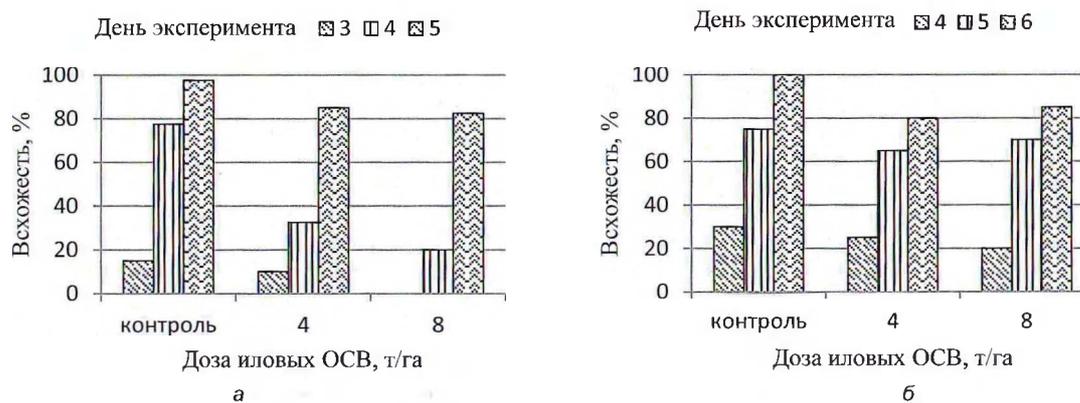


Рис. 2. Динамика всхожести тест-объектов: а – кресс-салат, б – ячмень

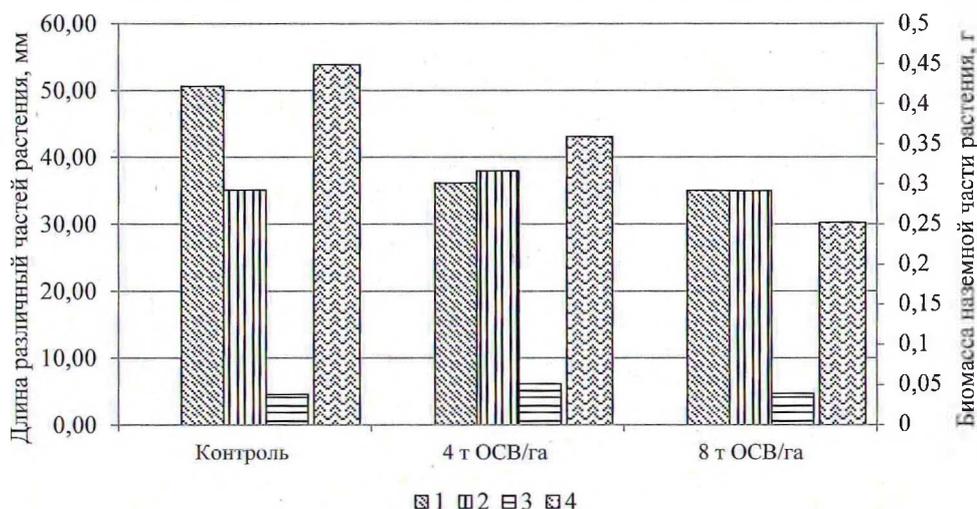


Рис. 3. Влияние дозы вносимых в почву иловых ОСВ на характеристики роста и развития кресс-салата: 1 – длина корня; 2 – длина стебля; 3 – длина листа; 4 – биомасса

метром является длина и развитость корневой системы, так как корни способны сорбировать токсичные вещества из почвы. Поэтому угнетающее действие от внесения иловых осадков можно объяснить воздействием содержащихся в них токсикантов. На такие показатели, как длина стебля и листа, внесение иловых ОСВ не оказывает существенного влияния.

Данные, характеризующие рост и развитие ячменя на шестые сутки, представлены на рис. 4. Использование иловых ОСВ в качестве биоудобрения при выращивании ячменя положительно сказывается на таких характеристиках, как длина coleoptily, длина первого и второго листа. Полученные данные можно объяснить высокой удобрительной способностью используемого осадка. Однако угнетаются такие показатели, как средняя длина корней и биомасса наземной части растения. Полученные результаты могут быть связаны с воздействием токсичных веществ, содержащихся в иловых ОСВ.

На следующем этапе работы с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM5610 LV, оснащенного системой химического микроанализа EDX JED-2201 JEOL (Япония), анализировали элементный состав зольного осадка, образованного при сжигании образцов илового ОСВ и наземной части тест-объектов. Полученные данные представлены в таблице.

К числу наиболее опасных ТМ, если учитывать их токсичность, стойкость и способность накапливаться во внешней среде, а также масштабы распространения, относятся ртуть, свинец, кадмий, кобальт, никель, цинк, медь, молибден, олово, мышьяк [20]. Как видно из таблицы, в иловом ОСВ содержатся следующие ТМ (%): Mn (0,58), Fe (13,74), Cu (1,27), Zn (3,22), As (0,08).

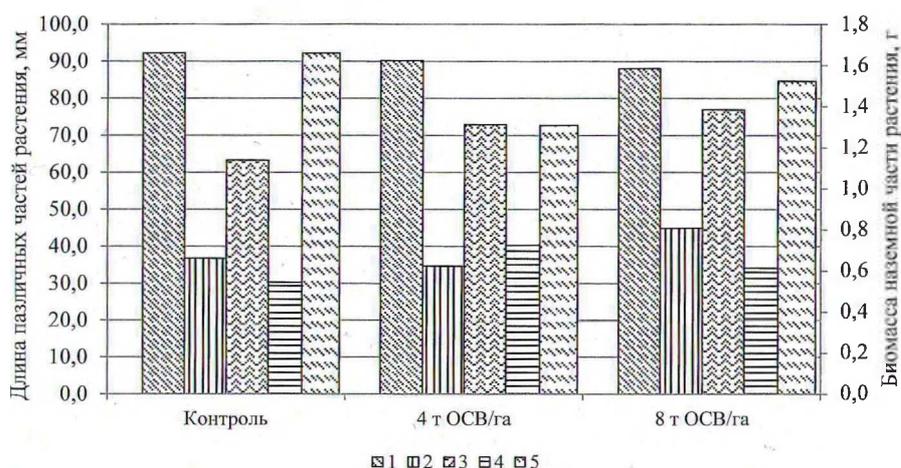


Рис. 4. Влияние дозы вносимых иловых ОСВ на характеристики роста и развития ячменя: 1 – средняя длина корней; 2 – длина coleoptиля; 3 – длина первого листа; 4 – длина второго листа; 5 – биомасса

Элементный анализ золы илового ОСВ и наземной части тест-объектов (содержание элементов, %)

Элемент	Иловый ОСВ	Кресс-салат			Ячмень		
		контроль	доза 4 т/га	доза 8 т/га	контроль	доза 4 т/га	доза 8 т/га
Na	–	3,01±0,05	2,78±0,04	0,28±0,05	–	0,09±0,04	1,57±0,05
Mg	8,33±0,03	29,56±0,03	23,42±0,03	27,31±0,03	11,25±0,03	9,55±0,03	10,27±0,04
Al	6,35±0,03	0,48±0,03	0,33±0,03	0,5±0,03	–	0,88±0,03	0,46±0,04
Si	28,81±0,03	2,48±0,03	1,21±0,03	0,38±0,03	6,35±0,03	4,9±0,03	3,93±0,04
P	6,08±0,04	6,14±0,04	5,46±0,04	6,5±0,04	6,45±0,04	6,8±0,04	5,0±0,05
S	0,63±0,03	10,39±0,03	11,5±0,03	12,22±0,03	2,98±0,03	3,45±0,03	4,73±0,04
Cl	–	1,65±0,02	1,51±0,01	1,3±0,02	9,13±0,01	6,53±0,02	6,22±0,02
K	2,59±0,02	25,72±0,02	36,56±0,02	31,22±0,02	59,72±0,02	62,81±0,02	63,75±0,02
Ca	27,2±0,02	15,9±0,03	11,01±0,03	14,0±0,03	4,12±0,03	4,99±0,04	4,07±0,05
Ti	1,12±0,03	–	–	–	–	–	–
Mn	0,58±0,04	–	–	–	–	–	–
Fe	13,74±0,04	–	–	–	–	–	–
Cu	1,27±0,08	2,66±0,09	3,14±0,08	2,94±0,09	–	–	–
Zn	3,22±0,1	2,02±0,11	3,08±0,1	3,35±0,11	–	–	–
As	0,08±0,06	–	–	–	–	–	–

Известно, что растения способны поглощать ТМ за счет физико-химической адсорбции, которая носит неспецифичный характер [21]. Однако при дозах внесения 4 и 8 т ОСВ/га произошло незначительное увеличение содержания соединений Zn и Cu в наземной части кресс-салата. Накопление ТМ в биомассе ячменя не наблюдалось.

Заключение. Для определения возможности использования иловых ОСВ необходимо изучение их состава и свойств. В ходе научно-исследовательской работы была проведена оценка возможности использования иловых ОСВ без предварительной обработки в качестве органоминерального удобрения для некоторых видов растений. Был определен элементарный состав иловых ОСВ, что позволит впоследствии рассчитать класс опасности и оценить степень загрязнения отхода ТМ. Знание элементного состава позволит рассчитать допустимые дозы ОСВ, которые можно вносить в почву в качестве удобрений растений без последствий для окружающей среды и человека.

В ходе анализа элементного состава золы иловых ОСВ и наземной биомассы тест-объектов установлено, что при дозах внесения 4 и 8 т ОСВ/га происходит незначительное накопление в наземной части кресс-салата соединений Zn и Cu (не превышают допустимые нормативы), в наземной части ячменя накоплений ТМ не было. Дальнейшие исследования предполагается

направить на разработку оптимального состава органоминерального удобрения на основе иловых ОСВ и провести полевые испытания на различных культурных растениях.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке ГБ 21-061 «Использование осадков сточных вод после безреагентной детоксикации в качестве биоудобрения».

Список использованных источников

1. Смирнов, Ю. Д. Перспективы полезного использования золы сжигания осадка сточных вод в народном хозяйстве / Ю. Д. Смирнов, М. В. Сучкова // *Вода и экология: проблемы и решения*. – 2019. – № 3. – С. 16–25. doi: 10.23968/2305-3488.2019.24.3.16-25
2. Дрозд, Г. Я. Технические аспекты утилизации депонированных осадков сточных вод / Г. Я. Дрозд // *Вода и экология: проблемы и решения*. – 2014. – № 1. – С. 35–50.
3. Sewage sludge ash – a promising secondary phosphorus source for fertilizer production / H. Herzel [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2016. – Vol. 542. – Part B. – P. 1136–1143. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.059
4. Дрозд, Г. Я. Биотехнологические вопросы утилизации осадков сточных вод / Г. Я. Дрозд, Е. Н. Пашутина, С. Н. Давыдов // *Вода и экология: проблемы и решения*. – 2014. – № 2. – С. 66–77.
5. Li, J. Innovative solidification/stabilization of lead contaminated soil using incineration sewage sludge ash / J. Li, C. S. Poon // *Chemosphere*. – 2017. – Vol. 173. – P. 143–152. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.01.065
6. Обработка и утилизация осадков сточных вод на очистных сооружениях Санкт-Петербурга: опыт и перспективы / Б. В. Васильев [и др.] // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2018. – № 10. – С. 47–51.
7. Теучеж, А. А. Технология ускоренной переработки подстилочного свиного навоза в органическое удобрение / А. А. Теучеж // *Политематический сетевой электронный науч. журн. КубГАУ*. – 2017. – № 133(09). – С. 1094–1113. doi: 10.21515/1990-4665-133-080
8. Использование осадков сточных вод городских очистных сооружений при возделывании кукурузы / А. В. Сорока [и др.] // *Земледелие и селекция в Беларуси*. – 2020. – № 56. – С. 160–167.
9. Харкевич, Л. П. Урожай и качество сена многолетних трав в зависимости от применения осадков сточных вод и известкования / Л. П. Харкевич // *Проблемы агрохимии и экологии*. – 2011. – № 2. – С. 20–22.
10. Агроэкологический эффект осадков сточных вод при удобрении многолетних трав / Г. Е. Мерзлая [и др.] // *Агрохимические проблемы биологической интенсификации земледелия*. – М.: Изд-во ГНУ ВНИПТИОУ, 2005. – С. 138–143.
11. Проколова, Л. В. Функционирование агроценозов при использовании осадка сточных вод в качестве органического удобрения / Л. В. Проколова, Ю. И. Житин // *Вестн. Воронеж. гос. аграр. ун-та*. – 2013. – № 1 (36). – С. 35–39.
12. Чекаев, Н. П. Влияние компостов из осадков сточных вод на физико-химические свойства чернозема выщелоченного и урожайность сельскохозяйственных культур / Н. П. Чекаев // *Повышение эффективности использования земель сельскохозяйственного назначения*. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. аграр. ун-т, 2009. – С. 128–131.
13. Оспанов, К. Т. Оценка современного состояния обработки осадков сточных вод станции аэрации г. Алматы, Республика Казахстан / К. Т. Оспанов, Э. М. Кульдеева, О. П. Тамабаев // *Вода и экология: проблемы и решения*. – 2014. – № 1. – С. 26–34.
14. Насыров, И. А. Проблемы утилизации иловых осадков очистных сооружений / И. А. Насыров, Г. В. Маврин, Н. Г. Шайхиев // *Вестн. технол. ун-та*. – Казань. – 2015. – Т. 18, № 19. – С. 257–259.
15. Игнатенко, А. В. Биотестирование химической безопасности осадков сточных вод / А. В. Игнатенко // *Труды БГТУ. Сер. 2. Химические технологии, биотехнология, геоэкология*. – 2017. – № 2 (199). – С. 10–14.
16. Николаева, О. В. Совершенствование лабораторного фитотестирования для экотоксикологической оценки почв / О. В. Николаева, В. А. Терехова // *Почвоведение*. – 2017. – № 9. – С. 1141–1152. doi: 10.7868/S0032180X17090052
17. Шабалина, О. М. Оценка применимости некоторых двудольных и однодольных растений для фитотестирования городских почв / О. М. Шабалина, Т. Н. Демьяненко // *Ульянов. мед.-биол. журн.* – 2012. – № 1. – С. 103–113.
18. Мерзлая, Г. Е. Трансформация токсичных осадков сточных вод в экологически безопасные удобрения / Г. Е. Мерзлая, Р. А. Афанасьева // *Химическая безопасность*. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 180–190. doi: 10.25514/CHS.2018.1.12892
19. Лисовицкая, О. В. Фитотестирование: основные подходы, проблемы лабораторного метода и современные решения / О. В. Лисовицкая, В. А. Терехова // *Доклады по экологическому почвоведению*. – 2010. – Т. 1, № 13. – С. 1–18.
20. Раковская, Е. Г. Исследование загрязнения почв тяжелыми металлами / Е. Г. Раковская, М. Е. Рудов, А. С. Прохоров // *Вестн. МАНЭБ*. – 2020. – Т. 25, № 1. – С. 13–17.
21. Яппаров, А. Х. Комплексный подход к рекультивации нефтезагрязненных почв / А. Х. Яппаров, И. А. Дегтярева, А. Я. Хидиятуллина // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 1. – С. 34–40.

Поступила 21.02.2022