

ПРИМЕНЕНИЕ ОТРАБОТАННЫХ СОРБЕНТОВ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТОЧНЫХ ВОД ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РОСТА РАСТЕНИЙ

¹М.П. Фёдоров, академик РАН, ²В.И. Масликов, ²А.В. Чечевичкин, ²В.Н. Чечевичкин, ²Л.А. Якунин

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Инженерно-строительный институт,

²Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Показана возможность использования отработанных в процессах очистки поверхностных сточных вод сорбентов из фильтров ФОПС® для интенсификации роста растений редиса сорта "Французский завтрак". Выявлена способность указанных отработанных сорбентов, вносимых в почвенно-грунтовые субстраты (ПГС) в качестве обогащённых микроэлементами структурообразующих добавок, существенно стимулировать развитие корневой системы при некотором незначительном ингибировании роста побегов. В ходе экспериментов определена оптимальная величина добавки отработанных в процессах очистки поверхностного стока (с автодорог) сорбентов в ПГС, обеспечивающая наибольший прирост биомассы корневой системы растений, используемых в качестве тест-культуры. Установлено, что накопление тяжёлых металлов (ТМ) в листьях и корнеплодах растительной тест-культуры возрастает с увеличением их содержания в отработанных сорбентах, но при этом фактические концентрации ТМ в растениях не превышают нормативов на содержание их в сочных кормах для животноводства. Произведена оценка применения отработанных в процессах водоочистки сорбентов для создания почвогрунтов, используемых при рекультивации полигонов размещения твёрдых коммунальных отходов, промышленных отвалов, откосов автодорог, а также при восстановлении лесного фонда и ремедиации почв.

Ключевые слова: тест-культура, почвенно-грунтовые субстраты, экологическая безопасность, вторичное использование сорбентов, ремедиация почв, рекультивация полигонов ТКО, лесовосстановление

Статья поступила в редакцию 19.02.2021, доработана 10.05.2021, принята к публикации 29.05.2021

The Use of Waste Sorbents for Surface Wastewater Treatment to Intensify Plant Growth

¹M.P. Fedorov, Academician of RAS, ²V.I. Maslikov, ²A.V. Chechevichkin, ²V.N. Chechevichkin, ²L.A. Yakunin

¹Sankt-Petersburg Peter the Great Polytechnic University, 195251 Sankt-Petersburg, Russia,

²Higher School of Hydrotechnical and Energy Construction Institute of Civil Engineering of Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 195251 Sankt-Petersburg, Russia

The possibility of using sorbents from FOPS® filters, spent in the processes of purification of surface wastewater, is shown to intensify the growth of radish plants of the "French breakfast" variety. The ability of these waste sorbents, introduced into soil-ground substrates (SGS) as structure-forming additives enriched with microelements, was found to significantly stimulate the development of the root system with some slight inhibition of shoot growth. In the course of the experiments, the optimal value of the addition of sorbents spent in the processes of cleaning surface runoff (from roads) to the SGS was determined, which provides the greatest increase in the biomass of the root system of plants used as a test culture. It has been established that the accumulation of heavy metals (HMs) in the leaves and roots of a plant test culture increases with an increase in their content in the spent sorbents, but the actual concentrations of HMs in plants do not exceed the standards for their content in robust feed for animal husbandry. An assessment was made of the use of sorbents spent in water purification processes to create soil used in the reclamation of landfills for the placement of solid municipal waste, industrial dumps, road slopes, as well as in the restoration of forest resources and soil remediation.

Keywords: test culture, soil-ground substrates, ecological safety, secondary use of sorbents, soil remediation, reclamation of MSW landfills, reforestation

Received 19.02.2021, revised 10.05.2021, accepted for publication 29.05.2021

DOI: 10.18412/1816-0395-2021-7-26-31

Поверхностный сток с урбанизированных территорий подвергается сильному техногенному загрязнению, основной вклад в который вносит автотранспорт [1, 2]. Для очистки поверхностного стока с автодорог и селитебных территорий применяют различные по физическим принципам работы локальные очистные сооружения. Наиболее

перспективные из них — сооружения сорбционно-фильтрационной очистки на основе фильтров ФОПС® [3–7]. Такие сооружения работают по накопительному принципу: загрязнения поглощаются на фильтрующих и сорбционных материалах, которыми заполнены специальные контейнеры (фильтрующие патроны). После исчерпания ресурсов отра-

ботанные фильтры ФОПС® изымаются из очистных сооружений и утилизируются в виде пригодного для вторичной переработки пластика (полиэтилен, полипропилен), а также зернистых сорбционных материалов (активированный уголь, природный цеолит и т.д.), частично загрязнённых компонентами поверхностных сточных вод. К настоящему времени на терри-

тории только Европейской части России было введено в эксплуатацию более 800 фильтров ФОПС® различных типов. Ежегодно более 100 т отработанных зернистых фильтрующе-сорбционных материалов (природный цеолит, активированный уголь и другие) из фильтров ФОПС® утилизируются на полигонах отходов.

К загрязнениям, накопленным в отработанных после очистки поверхностного стока сорбционных материалах, относят биоразлагаемые вещества (нефтепродукты, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), органические вещества), а также микроэлементы питания растений (железо, марганец, цинк, медь и т.д.).

Содержание токсичных элементов (ртуть, кадмий, свинец, мышьяк) в поверхностном стоке с автодорог, как правило, незначительное, что практически не приводит к их накоплению в отработанных материалах водоочистки.

Использование отходов водоочистки в агрокультуре в настоящее время наиболее широко изучается применительно к осадкам и илам при внесении их непосредственно в почву [8, 9] или в составе смесей и компостов [10, 11], в том числе с использованием природных цеолитов [12, 13]. Для детоксикации почв и получения экологически чистой продукции применяют ископаемый [14] и активированный уголь [15], причём последний хорошо показал себя как активатор компостирования субстратов на основе осадков сточных вод [16] и твёрдых бытовых отходов [17].

Цель работы — оценка влияния на рост и развитие растений сорбционных материалов, отработанных в процессе очистки поверхностного стока, при их добавлении в стандартный почвогрунт (ПГ). Области применения таких почвенно-грунтовых субстратов (ПГС) могут быть: рекультивация полигонов, отвалов и склонов автодорог; восстановление лесного фонда; ремедиация почв [12, 18–20].

Объекты и методы исследования

Оценку возможности использования отработанных (после очистки поверхностных сточных вод) сорбционных материалов из фильтров ФОПС® в составе ПГС

проводили методом фитотестирования (биотестирования с применением растений) [21]. В качестве тест-культуры для этого был выбран редис европейский (*Raphanus sativus* L.) сорта "Французский завтрак" (ФЗ), отвечающий требованиям фитотестирования (короткий жизненный цикл, относительная дешевизна, высокая степень воспроизводимости результатов и т.д.) и достаточно широко применяющийся для данных целей [22–24].

В работе использовали семенной материал селекционно-семеноводческой компании "Гавриш" (Россия), который высаживали в вегетационные сосуды в виде пластиковых ящиков размером 600×400×200 мм. В ящики помещали различные субстраты (в количестве 28 дм³/ящик) на основе исходного ПГ с добавлением отработанных в процессах очистки поверхностного стока сорбционных материалов. В качестве последних использовали отработанный активированный уголь (АУ) из фильтров ФОПС®-МУ после очистки стока с автодорог [6] и отработанный природный цеолит (ПЦ) из фильтров ФОПС®-Ц после очистки стока, загрязнённого инфильтратом [5]. Отработанные сорбенты добавляли в испытуемые композиции на основе ПГ в количестве 0, 10, 20 и 40 % по объёму.

Исходный ПГ представлял собой дерново-подзолистую, суглинистую почву тёмного цвета с высоким содержанием органического вещества и гумуса. Почва имела слабокислую реакцию среды, довольно низкое содержание подвижных форм азота (90 мг/дм³) и калия (98 мг/дм³) и высокое содержание фосфора (290 мг/дм³) и подвижного железа (2010 мг/дм³). Внешний вид вегетационных сосудов с исходным ПГ и субстратами с содержанием в них 40 об. % АУ и ПЦ соответственно представлен на рис. 1.

Высадку семян редиса ФЗ в вегетационные сосуды проводили с помощью шаблона по 24 шт. на ящик в лунки глубиной 15 мм с расстоянием между лунками и между рядами лунок равным 90 мм.

Температурный режим выращивания редиса в теплице составлял 18–20 °С с периодичностью полива (~2,0 дм³/м²) 2 раза в неделю, с обязательным рыхлением

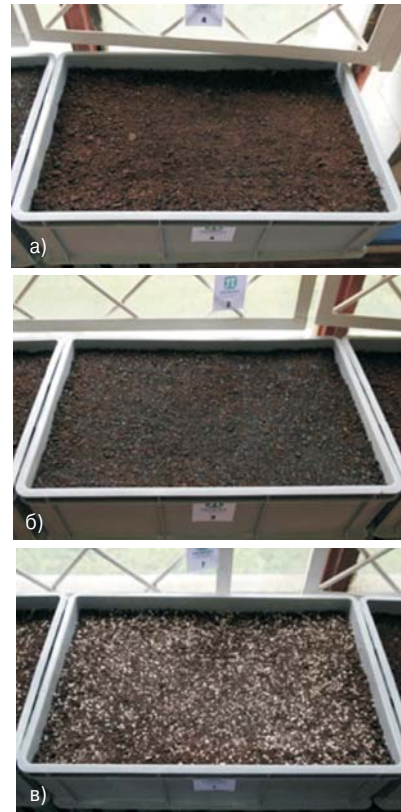


Рис. 1. Внешний вид вегетационных сосудов с различными ПГС:
а – исходный ПГ; б – ПГ + 40 об. % АУ;
в – ПГ + 40 об. % ПЦ

Fig. 1. Appearance of vegetative pots with various SSG:
a – initial SG; b – SG + 40 vol. % AC;
c – SG + 40 vol. % NZ

субстратов на следующий день после полива.

Период наблюдения за ростом редиса ФЗ составил 28 дней (с момента посадки), после чего растения удалялись из вегетационных сосудов и проводилось измерение длины и массы их побегов (п), корнеплодов (кп) и корешков (к). Биомасса этих частей растений высушивалась до постоянного веса в термостате при 80 °С. Из высушенных образцов готовили пробы методом кислотной минерализации для последующего их анализа на содержание тяжёлых металлов (ТМ) (Cd, Ni, Pb, Zn, Mn, Fe) методом атомно-адсорбционного анализа [14, 22, 24].

На основании измерений массы частей растения (побеги, корнеплоды, корешки) для них определялись индексы толерантности (ИТ) по формуле (1):

$$\text{ИТ} = M/M^0, \quad (1)$$

где M^0 — масса части растения, выращенного на чистом ПГ, г; M — масса той же части растения, выращенного в субстрате с добавкой АУ или ПЦ.

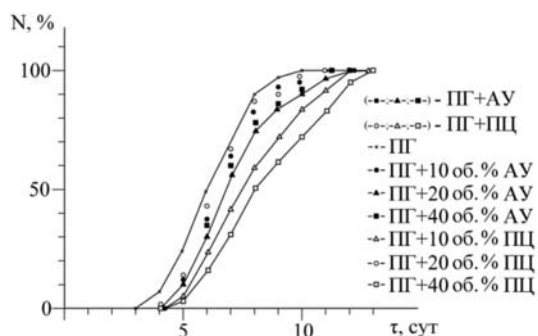


Рис. 2. Зависимость относительного количества проросших семян (N) редиса ФЗ на различных ПГС от времени (τ)

Fig. 2. Relative number of FB Radish germinated seeds (N) versus time (τ)



Рис. 3. Внешний вид вегетационных сосудов с растениями редиса ФЗ, выращенных на различных ПГС: ПГ + (0 об. %; 10 об. %; 20 об. %; 40 об. % ПЦ)

Fig. 3. Appearance of vegetative pots with FB Radish plants grown on various SGSSs: SG + (0 vol.%; 10 vol.%; 20 vol.%; 40 vol.% NZ)

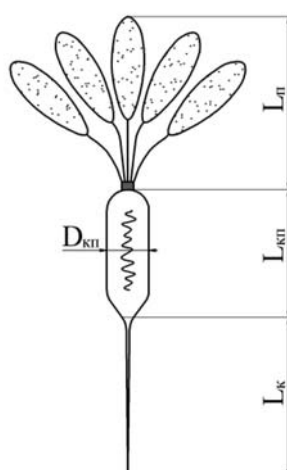


Рис. 4. Основные размерные характеристики редиса ФЗ:

L_p – длина побегов, мм; $L_{кп}$ – длина корнеплодов, мм; L_k – длина корешков, мм; $D_{кп}$ – диаметр корнеплода

Fig. 4. The main Radish FZ dimensional characteristics:

L_s – shoots length, mm; L_{rc} – root crops length, mm; L_r – roots length, mm; D_c – root crop diameter

На основании измерений концентрации ТМ в побегах ($C_{п}^j$, мг/кг) и корнеплодах ($C_{кп}^j$, мг/кг) определяли транслокационный фактор этих ТМ (ТФ_j) по формуле (2):

$$ТФ_j = C_{п}^j / C_{кп}^j, \quad (2)$$

где j – один из шести определяемых ТМ.

Результаты и их обсуждение

Проращение семян редиса ФЗ началось на 3–5 сутки и закончилось на 10–12 сутки.

На рис. 2 представлено изменение общего количества проросших семян во времени. Видно, что в чистом ПГ проращение начинается на 3-и сутки, причём на 6-е сутки прорастает около 50 % высаженных во все субстраты с АУ семян, а в субстратах с добавкой ПЦ проращение начинается на 4-е сутки и 50 % семян прорастает на 7–8-е сутки. Всхожесть семян редиса в чистом ПГ достигала 96 %, а в субстратах с добавками сорбентов – 93–94 %.

Средняя интенсивность роста побегов оценивалась после окончания проращения (т. е. после 10-го дня) по выборкам из 20–24 растений, выросших в каждом субстрате, и наблюдалась на протяжении 28 дней (табл. 1). Из табл. 1 видно, что в начале интенсивность роста побегов максимальна для чистого ПГ, а для ПГС на основе АУ и ПЦ – снижается с увеличением содержания добавляемого сорбента, причём к концу срока наблюдения эти различия исчезают.

Внешний вид вегетационных сосудов с растениями редиса ФЗ представлен на рис. 3, а основные размерные характеристики редиса ФЗ – на рис. 4.

Размеры отдельных частей растения, как видно из рис. 5, с увеличением содержания отработан-

ного сорбента в ПГС либо уменьшаются (длина побегов), либо практически постоянны (длина корнеплодов). Однако в области содержания добавок сорбента в пределах 10–20 об. % для АУ наблюдается некоторое увеличение длины корешков (до 6,8 %), более значительное – для добавок ПЦ (до 27,4 %). Этот факт свидетельствует о стимуляции развития корневой системы редиса ФЗ наличием определенного количества пористых частиц сорбента, являющихся источником влаги и микроэлементов.

Изменение массовых характеристик частей растений, выраженных в индексах толерантности (ИТ) для них, в зависимости от количества добавок сорбентов в субстраты представлено на рис. 6.

Видно, что добавка обоих сорбентов (АУ и ПЦ) приводит к значениям ИТ больше 1 (т.е. оказывает стимулирующее действие) для корнеплодов и корешков, причём для последних максимальные величины наблюдаются для значения 20 об. % как для ПЦ, так и для АУ, что согласуется с результатами работы [25], полученными при выращивании семенного материала картофеля (миниклубни) субстратным методом для композиции с содержанием 80 об. % торф : 20 об. % ПЦ. Для побегов ИТ имеют значения меньше 1 (т.е. добавка сорбента оказывает ингибирующее действие) при добавлении каждого из сорбентов в субстрат и уменьшаются по мере повышения содержания сорбентов. Эти факты также свидетельствуют о стимулирующем действии добавок отработанных сорбентов в субстраты на развитие корневой системы редиса ФЗ.

Определение содержания и накопления ТМ в растениях и их

Таблица 1. Средняя интенсивность роста побегов редиса ФЗ на различных ПГС, мм/сут

Table 1. Average growth rate of Radish FB shoots on various SGSSs, mm/day

Образцы субстратов	Время от начала посадки семян, сут							Всхожесть, %
	10	13	16	19	22	25	28	
ПГ + 10 % АУ	14	8	5	4	3	2	2	96
ПГ + 20 % АУ	12	8	4	3	3	2	2	96
ПГ + 40 % АУ	10	7	4	3	2	2	2	94
ПГ	14	9	5	4	3	3	3	96
ПГ + 10 % ПЦ	14	8	4	3	3	2	2	96
ПГ + 20 % ПЦ	11	7	4	3	3	2	2	94
ПГ + 40 % ПЦ	9	5	3	2	2	3	2	93

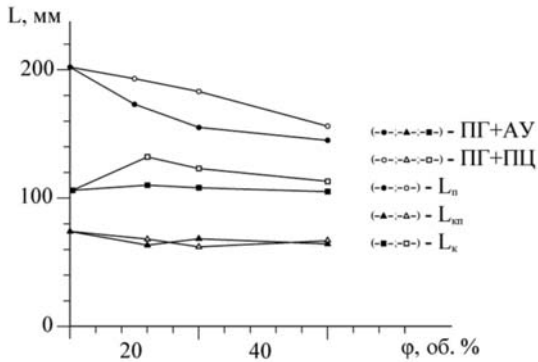


Рис. 5. Зависимость основных размерных характеристик (L , см. рис.4) редиса ФЗ от объёмной доли (φ) АУ или ПЦ в ПГС

Fig. 5. The main dimensional characteristics (L , see Fig. 4) of Radish FB versus volume fraction (φ) of SG or NZ in the SGS

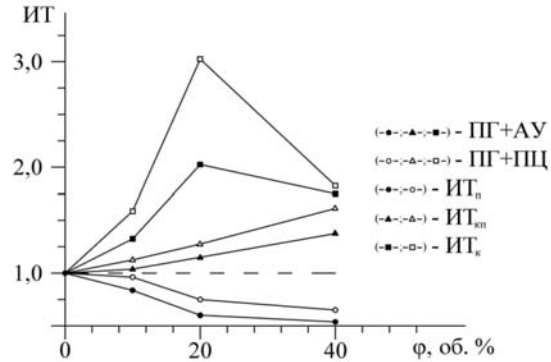


Рис. 6. Зависимость изменения ИТ отдельных частей редиса ФЗ от объёмной доли (φ) сорбентов, добавленных в ПГС

Fig. 6. TI change of individual parts of FB Radish versus volume fraction (φ) of sorbents added to the SGS

отдельных частях — широко распространённый метод [10, 11, 14, 19, 20] при оценке загрязнения агроландшафтов и их фиторемедиации, а также при выращивании сочных кормов для животноводства.

На рис. 7 и 8 показано содержание ТМ в образцах сухой биомассы побегов и корнеплодов редиса ФЗ, выращенных на субстратах с добавлением разного количества обработанных ПЦ и АУ соответственно. Видно, что с увеличением содержания обра-

ботанных сорбентов в субстрате растут концентрации всех тяжёлых металлов в побегах и корнеплодах по сравнению с контрольным ПГ. Кроме того, во всех случаях концентрации ТМ в корнеплодах выше, чем в побегах (т.е. ТФ меньше 1).

Пониженное содержание ТМ в побегах даёт основание для использования сорбентов (из фильтров ФОПС®), обработанных в процессах очистки поверхностного стока при создании почвогрунтовых смесей, пригодных для

выращивания сырых сочных кормов для животных.

В табл. 2 представлено содержание ТМ в сырой биомассе побегов редиса ФЗ, выращенной на субстратах с максимальным содержанием ПЦ и АУ (40 об. %). Выявлено, что значения ТФ для всех ТМ менее 1, причём как на субстратах с максимальным содержанием ПЦ и АУ, так и на контрольном ПГ.

Важно то, что значения концентраций всех контролируемых ТМ в побегах и корне-

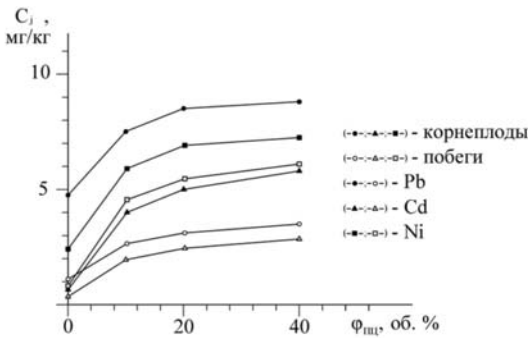


Рис. 7. Зависимость содержания ТМ (C_j) в побегах и корнеплодах редиса ФЗ от объёмной доли ПЦ ($\varphi_{ПЦ}$) в ПГС

Fig. 7. Content of HM (C_j) in FB Radish shoots and root crops versus volume fraction of NZ ($\varphi_{ПЦ}$) in SGS

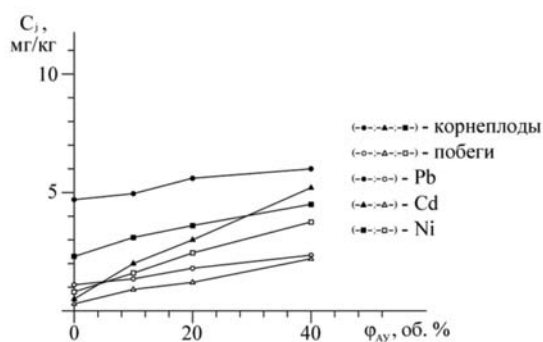


Рис. 8. Зависимость содержания ТМ (C_j) в побегах и корнеплодах редиса ФЗ от объёмной доли АУ ($\varphi_{АУ}$) в ПГС

Fig. 8. Content of HM (C_j) in FB Radish shoots and root crops versus volume fraction of AC (φ_{AC}) in SGS

Таблица 2. Содержание ТМ, мг/кг, в сырой биомассе редиса ФЗ при использовании различных ПГС

Table 2. HM content, mg / kg, in the raw biomass of FB Radish when using various SGSs

ТМ	Побеги			Корнеплоды			ТФ			Нормативы*		
	ПГ + 40 % АУ	ПГ + 40 % ПЦ	ПГ	ПГ + 40 % АУ	ПГ + 40 % ПЦ	ПГ	ПГ + 40 % АУ	ПГ + 40 % ПЦ	ПГ	П.П.	Сочные корма	
											П	К
Mn	18,0	19,4	2,46	19,2	23,4	7,60	0,94	0,83	0,32	X	X	X
Pb	0,16	0,24	0,08	0,26	0,38	0,21	0,62	0,63	0,38	0,5	5	5
Cd	0,16	0,20	0,03	0,22	0,25	0,03	0,73	0,80	1,00	0,03	0,3	0,3
Zn	13,7	17,2	1,42	14,9	21,9	4,67	0,92	0,79	0,30	10	50	100
Ni	0,26	0,42	0,06	0,20	0,31	0,11	1,30	1,35	0,55	0,5	3	3
Fe	17,8	18,6	3,34	20,5	25,3	6,32	0,87	0,74	0,53	X	100	100

*Нормативы содержания: П.П. – в продуктах питания (сырых овощах и зелени) [27]; П – в побегах сырых сочных кормов для животных [26]; К – в корнеплодах [26]; X – отсутствует [26].

плодах значительно меньше, чем нормативные показатели для сочных кормов [26], используемых в животноводстве. Установлено, что концентрации свинца и никеля в корнеплодах ниже, чем нормативы их содержания в биомассе овощей — продуктов питания человека [27].

Литература

1. Дахова О.О., Хучунаев Б.М., Куповых Г.В. Химическое и физическое загрязнение городских экосистем автотранспортом. Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2016. № 4. С. 67–72.
2. Евстигнеева Ю.В., Евстигнеева Н.А. Актуальность задачи очистки поверхностного стока с дорожного полотна автомобильных дорог. Научное обозрение. 2019. № 2. С. 26–30.
3. Чечевичкин А.В. Проектирование и применение локальных очистных сооружений поверхностного стока на основе фильтров ФОПС®. СПб., Изд-во "Любавич", 2017. 176 с.
4. Бартова Л.В., Лабутина М.В. Дождевая канализация города Перми: направления развития. Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2020. Т. 1. С. 197–203.
5. Ватин Н.И., Панкова Г.А., Леонов Л.В., Пробирский М.Д., Рублевская О.Н., Чечевичкин А.В., Якунин Л.А. Тестовая эксплуатация фильтра ФОПС® с природным цеолитом для очистки загрязнённого инфильтратом поверхностного стока. Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 9. С. 39–49.
6. Ватин Н.И., Греков М.А., Леонов Л.В., Пробирский М.Д., Рублевская О.Н., Чечевичкин А.В., Якунин Л.А. Опыт всесезонной эксплуатации фильтра ФОПС® при очистке поверхностного стока с техногенно-нагруженной селитебной территории. Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 8. С. 40–50.
7. Винокуров К.И., Крестьянинова А.Ю. Локальные очистные сооружения поверхностного стока на автомобильных дорогах и мостовых переходах. Экология и строительство. 2019. № 4. С. 43–53.
8. Данилович Д.А. О регулировании использования осадка сточных вод как удобрения. Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2017. № 2. С. 50–53.
9. Фролова Е.А., Кряжевских Н.А., Глухова Е.И. Использование осадков сточных вод г. Екатеринбурга в качестве нетрадиционных удобрений при выращивании посадочного материала сосны обыкновенной (*Pinus Sylvestris* L.). Леса России и хозяйство в них. 2017. № 2 (61). С. 41–46.
10. Лучицкая О.А., Севостьянов С.М. Применение компоста на основе осадка сточных вод для выращивания растений. Плодородие. 2016. № 1. С. 47–50.

Выводы

1. Установлено, что добавки отработанных в процессах водоочистки сорбентов (активированный уголь и природный цеолит) из фильтров ФОПС® в почвогрунт в количестве до 20 об. % практически не влияют на всхожесть семян и дальнейший рост

References

1. Dakhova O.O., Khuchunaev B.M., Kupovykh G.V. Khimicheskoe i fizicheskoe zagryaznenie gorodskikh ekosistem avtotransportom. Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki. 2016. № 4. S. 67–72.
2. Evstigneeva Yu.V., Evstigneeva N.A. Aktual'nost' zadachi ochistki poverkhnostnogo stoka s dorozhnogo polotna avtomobil'nykh dorog. Nauchnoe obozrenie. 2019. № 2. S. 26–30.
3. Chechevichkin A.V. Proektirovanie i primenenie lokal'nykh ochistnykh sooruzhenii poverkhnostnogo stoka na osnove fil'trov FOPS®. SPb., Izd-vo "Lyubavich", 2017. 176 s.
4. Bartova L.V., Labutina M.V. Dozhdevaya kanalizatsiya goroda Permi: napravleniya razvitiya. Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika. 2020. T. 1. S. 197–203.
5. Vatin N.I., Pankova G.A., Leonov L.V., Probirskii M.D., Rublevskaya O.N., Chechevichkin A.V., Yakunin L.A. Testovaya ekspluatatsiya fil'tra FOPS® s prirodnyim tseolitom dlya ochistki zagryaznenno-go infiltratom poverkhnostnogo stoka. Vodospabzhenie i sanitarnaya tekhnika. 2017. № 9. S. 39–49.
6. Vatin N.I., Grekov M.A., Leonov L.V., Probirskii M.D., Rublevskaya O.N., Chechevichkin A.V., Yakunin L.A. Opyt vsesazonnoi ekspluatatsii fil'tra FOPS® pri ochistke poverkhnostnogo stoka s tekhnogenno-nagruzhennoi selitebnoi territorii. Vodospabzhenie i sanitarnaya tekhnika. 2018. № 8. S. 40–50.
7. Vinokurov K.I., Krest'yaninova A.Yu. Lokal'nye ochistnye sooruzheniya poverkhnostnogo stoka na avtomobil'nykh dorogakh i mostovykh perekhodakh. Ekologiya i stroitel'stvo. 2019. № 4. S. 43–53.
8. Danilovich D.A. O regulirovani ispol'zovaniya osadka stochnykh vod kak udobreniya. Nailuchshie dostupnye tekhnologii vodospabzheniya i vodootvedeniya. 2017. № 2. S. 50–53.
9. Frolova E.A., Kryazhevskikh N.A., Glukhova E.I. Ispol'zovanie osadkov stochnykh vod g. Ekaterinburga v kachestve netraditsionnykh udobrenii pri vyrashchivani posadochnogo materiala sosny obyknovnoyi (Pinus Sylvestris L.). Lesa Rossii i khozyaistvo v nikh. 2017. № 2 (61). S. 41–46.
10. Luchitskaya O.A., Sevost'yanov S.M. Primenenie komposta na osnove osadka stochnykh vod dlya vyrashchivaniya rastenii. Plodorodie. 2016. № 1. S. 47–50.

побегов тест-культуры (редиса "Французский завтрак"), однако при увеличении их количества (до 40 об. %) происходит ухудшение этих показателей.

2. Показано, что добавка 15 ± 5 об. % отработанных сорбентов в стандартный дерново-подзолистый субстрат оказывает наиболее стимулирующее действие на развитие растений тест-культуры.

3. Увеличение содержания отработанных сорбентов в субстратах оказывает некоторое ингибирующее действие на рост побегов тест-культуры, но одновременно стимулирует развитие корневой системы растений.

4. Использование отработанных сорбентов из фильтров ФОПС® в качестве добавок в почвенно-грунтовые субстраты приводит к незначительному накоплению в побегах и корнеплодах растительной тест-культуры, выращенной в них, тяжёлых металлов (Mn, Pb, Cd, Zn, Ni, Fe) в количествах существенно более низких, чем нормативы их содержания в сочных кормах для животноводства.

11. Лучицкая О.А., Севостьянов С.М. Использование компоста на основе осадка сточных вод в цветоводстве. *Агрохимический вестник*. 2010. № 2. С. 36–38.
12. Кабанова С.А., Кулик К.Н., Данченко М.А. Повышение плодородия почвы в зелёной зоне г. Астаны. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2017. № 4 (48). С. 99–105.
13. Арефьев А.Н., Кузин Е.Н., Кузина Е.Е. Влияние осадков сточных вод и их сочетаний с цеолитом на продуктивность сельскохозяйственных культур. *Нива Поволжья*. 2018. № 1 (46). С. 2–8.
14. Сафронов В.П., Боcharникова Е.А., Матыченков В.В., Носенко С.И. Использование подмосковного угля для получения органических удобрений, снижающих содержание тяжёлых металлов в растениях. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2016. № 4. С. 71–80.
15. Мухин В.М., Спиридонов Ю.Я. Оздоровление почв, загрязнённых пестицидами, с помощью угледсорбционных технологий. *Аграрная наука*. 2019. №S2. С. 156–159.
16. Pan C., Fu X., Lu W., Ye R., Guo H., Wang H., Chusov A. Effects of conductive carbon materials on dry anaerobic digestion of sewage sludge: Process and mechanism. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. V. 384. P. 121339.
17. Джамалова Г.А., Мусина У.Ш., Еликбаев Б.К., Дзholdьбаева С.М., Дюсебева И.А., Рисбекова Г.М., Кайдарова Г.Е., Капар А.Т. Изменчивость концентрации ксенобиотиков и микробиосенсоза в компостируемом субстрате "твёрдые бытовые отходы + активированный уголь". *Современные наукоёмкие технологии*. 2018. № 7. С. 31–36.
18. Безуголова О.С., Невидомская Д.Г., Морозов И.В. Почвы территорий полигонов твёрдых бытовых отходов и их экология. Ростов н/Д, изд-во ЮФУ, 2010. 263 с.
19. Чибрик Т.С., Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А. Экологические основы и опыт биологической рекультивации нарушенных промышленностью земель. Екатеринбург, изд-во Уральского ун-та, 2011. 268 с.
20. Chomczynska M., Wasag H., Kujawska J. Application of Spent Ion Exchange Sorbents for the Reclamation of Degraded Soils. *Journal of Ecological Engineering*. 2019. V. 20. № 2. P. 239–244.
21. Чеснокова С.М., Чугай Н.В. Биологические методы оценки качества окружающей среды: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 2. Методы биотестирования. Владимир, изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. 92 с.
22. Елизарьева Е.Н., Янбаев Ю.А., Кулагин А.Ю. Растения для фиторемедиации воды, загрязнённой тяжёлыми металлами. *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2016. № 3 (191). С. 68–75.
23. Елизарьева Е.Н., Янбаев Ю.А., Кулагин А.Ю., Усманов И.Ю. Зависимость аккумуляции растениями никеля и кадмия от их концентрации. *Вестник Нижневолжского государственного университета*. 2017. № 1. С. 109–116.
24. Козарь Е.В., Домблидес Е.А., Солдатенко А.В. Факторы, влияющие на получение ДН-растений в культуре микроспор *in vitro* редиса европейского. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2020. Т. 24. № 1. С. 31–39.
25. Петухов С.Н., Аксенов А.Г., Сибирёв А.В., Дорохов А.С. Технологические и биологические предпосылки разработки инновационной технологии получения микроклубней картофеля. *Агротехника и энергообеспечение*. 2019. № 4 (25). С. 6–16.
26. Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения. М., Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. 54 с.
27. Сборник важнейших официальных материалов по санитарным и противоэпидемическим вопросам. В 7 т. Т. 5. Санитарные правила и нормы (СанПиН), гигиенические нормативы и перечень методических указаний и рекомендаций по гигиене питания. М., МП "Рарог", 1992. 386 с.
11. Luchitskaya O.A., Sevost'yanov S.M. Ispol'zovanie komposta na osnove osadka stochnykh vod v tsvetovodstve. *Agrokhimicheskii vestnik*. 2010. № 2. S. 36–38.
12. Kabanova S.A., Kulik K.N., Danchenko M.A. Povyshenie plodorodiya pochvy v zelenoi zone g. Astany. *Izvestiya Nizhnevolskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 2017. № 4 (48). S. 99–105.
13. Aref'ev A.N., Kuzin E.N., Kuzina E.E. Vliyaniye osadkov stochnykh vod i ikh sochetanii s tselitom na produktivnost' sel'skokhozyaistvennykh kultur. *Niva Povolzh'ya*. 2018. № 1 (46). S. 2–8.
14. Safronov V.P., Bocharnikova E.A., Matychenkov V.V., Nosenko S.I. Ispol'zovanie podmoskovnogo uglya dlya polucheniya organicheskikh udobrenii, snizhayushchikh sodержanie tyazhelykh metallov v rasteniyakh. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*. 2016. № 4. S. 71–80.
15. Mukhin V.M., Spiridonov Yu.Ya. Ozdorovlenie pochv, zagryaznennykh pestitsidami, s pomoshch'yu ugledsorbtsionnykh tekhnologii. *Agrarnaya nauka*. 2019. №S2. S. 156–159.
16. Pan C., Fu X., Lu W., Ye R., Guo H., Wang H., Chusov A. Effects of conductive carbon materials on dry anaerobic digestion of sewage sludge: Process and mechanism. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. V. 384. P. 121339.
17. Dzhamalova G.A., Musina U.Sh., Elikbaev B.K., Dzholdybaeva S.M., Dyusebeva I.A., Risbekova G.M., Kaidarova G.E., Kapar A.T. Izmenchivost' kontsentratsii ksenobiotikov i mikrobiotsenoza v kompostiruемом substrate "tverdye bytovye otkhody + aktivirovannyi ugol". *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2018. № 7. S. 31–36.
18. Bezuglova O.S., Nevidomskaya D.G., Morozov I.V. Pochvy territorii poligonov tverdykh bytovykh otkhodov i ikh ekologiya. Rostov n/D, izd-vo YuFU, 2010. 263 s.
19. Chibrik T.S., Lukina N.V., Filimonova E.I., Glazyrina M.A. Ekologicheskie osnovy i opyt biologicheskoi rekultivatsii narushennykh promyshlennost'yu zemel'. Ekaterinburg, izd-vo Ural'skogo un-ta, 2011. 268 s.
20. Chomczynska M., Wasag H., Kujawska J. Application of Spent Ion Exchange Sorbents for the Reclamation of Degraded Soils. *Journal of Ecological Engineering*. 2019. V. 20. № 2. P. 239–244.
21. Chesnokova S.M., Chugai N.V. Biologicheskie metody otsenki kachestva okruzhayushchei sredy: uchebnoe posobie. V 2 ch. Ch. 2. Metody biotestirovaniya. Vladimir, izd-vo Vladim. gos. un-ta, 2008. 92 s.
22. Elizar'eva E.N., Yanbaev Yu.A., Kulagin A.Yu. Rasteniya dlya fitoremediatsii vody, zagryaznennoi tyazhelymi metallami. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016. № 3 (191). S. 68–75.
23. Elizar'eva E.N., Yanbaev Yu.A., Kulagin A.Yu., Usmanov I.Yu. Zavisimost' akkumulyatsii rasteniyami nikelya i kadmiya ot ikh kontsentratsii. *Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017. № 1. S. 109–116.
24. Kozar' E.V., Domblides E.A., Soldatenko A.V. Faktory, vliyayushchie na poluchenie DN-rastenii v kul'ture mikrospor *in vitro* redisa evropeiskogo. *Vavilovskii zhurnal genetiki i selektsii*. 2020. T. 24. № 1. S. 31–39.
25. Petukhov S.N., Aksenov A.G., Sibirev A.V., Dorokhov A.S. Tekhnologicheskie i biologicheskie predposylki razrabotki innovatsionnoi tekhnologii polucheniya mikroklubnei kartofelya. *Agrotekhnika i energoobespechenie*. 2019. № 4 (25). S. 6–16.
26. Gigenicheskie trebovaniya k ispol'zovaniyu stochnykh vod i ikh osadkov dlya orosheniya i udobreniya. M., Informatsionno-izdatel'skii tsentr Minzdrava Rossii, 1997. 54 s.
27. Sbornik vazhneishikh ofitsial'nykh materialov po sanitarnym i protivoepidemicheskim voprosam. V 7 t. T. 5. Sanitarnye pravila i normy (SanPiN), gigenicheskie normativy i perechen' metodicheskikh ukazanii i rekomendatsii po gigiene pitaniya. M., MP "Rarog", 1992. 386 s.

М.П. Фёдоров – академик РАН, д-р техн. наук, президент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), e-mail: m.fedorov@spbstu.ru • В.И. Масликов – д-р техн. наук, профессор, Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (ВШГИЭС ИСИ СПбПУ), e-mail: maslikov_vi@spbstu.ru • А.В. Чечевичкин – инженер, ВШГИЭС ИСИ СПбПУ, e-mail: chechevichkin_av@spbstu.ru • В.Н. Чечевичкин – вед. инженер, ВШГИЭС ИСИ СПбПУ, e-mail: chechevichkin_vn@spbstu.ru • Л.А. Якунин – инженер, ВШГИЭС ИСИ СПбПУ, e-mail: yakunin_la@spbstu.ru

M.P. Fedorov – Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), President, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, e-mail: m.fedorov@spbstu.ru • V.I. Maslikov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Higher School of Hydrotechnical and Energy Construction Institute of Civil Engineering of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (HSHEC ICE SpbPU), e-mail: maslikov_vi@spbstu.ru • A.V. Chechevichkin – Engineer, HSHEC ICE SpbPU, e-mail: chechevichkin_av.spbstu.ru • V.N. Chechevichkin – Led. Engineer, HSHEC ICE SpbPU, e-mail: chechevichkin_vn@spbstu.ru • L.A. Yakunin – Engineer, HSHEC ICE SpbPU, e-mail: yakunin_la@spbctu.ru