

УТИЛИЗАЦИЯ ОТРАБОТАННЫХ ЦЕОЛИТОВЫХ СОРБЕНТОВ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТОЧНЫХ ВОД В СОСТАВЕ ИСКУССТВЕННЫХ ПОЧВОГРУНТОВ

¹В.И. Масликов, ¹А.В. Чечевичкин, ¹В.Н. Чечевичкин, ¹Л.А. Якунин

¹Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Методом фитотестирования в открытом грунте продемонстрировано положительное влияние добавок в почвогрунты (ПГ) клиноптилолитовых пород (КП-пород) из фильтров ФОПС®, отработанных в процессах очистки поверхностных сточных вод, на развитие корневой системы и засухоустойчивость растений. Выявлено, что отработанные КП-породы накапливают в процессе очистки вод тяжёлые металлы (ТМ), однако их концентрации не превышают ПДК этих ТМ в почвах и осадках сточных вод, используемых в сельском хозяйстве. Установлено, что корневая система растений в значительной мере утилизирует не только элементы обменного комплекса КП-пород (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), но и каркасообразующие элементы (Al, Si). Отмечено, что Fe и Mn из КП-пород утилизируются растениями незначительно, что приводит к их локальным накоплениям в ПГ и создаёт условия для образования по ним ортштейновых структур. Предложено использовать отработанные в процессах очистки поверхностного стока материалы на основе КП-пород из фильтров ФОПС® для локализации ТМ из почв, а также при рекультивации полигонов твёрдых коммунальных отходов и восстановлении лесного фонда.

Ключевые слова: фильтр ФОПС®, вторичное использование сорбентов, тест-культура, цеолит, ремедиация почв, ортштейны, рекультивация полигонов ТКО

Статья поступила в редакцию 27.10.2021, доработана 08.02.2022, принята к публикации 28.03.2022

Reuse of Spent Zeolite Sorbents for Surface Runoff Treatment as Part of Artificial Soils

¹V.I. Maslikov, ¹A.V. Chechevichkin, ¹V.N. Chechevichkin, ¹L.A. Yakunin

¹Higher School of Hydrotechnical and Energy Construction of the Engineering and Construction Institute of Saint Petersburg Polytechnic University named after Peter the Great

Phytotesting in open field proved the effectiveness of introducing clinoptilolite rocks (CP-rocks) into soils from FOPS® filters after surface wastewater treatment on the roots development and drought resistance of plants. It is revealed that spent CP-rocks accumulate heavy metals (HMs) during water treatment, however, their concentrations do not exceed the MAC of these HMs in soils and wastewater sludge used in agriculture. It is discovered that plant roots to a large extent utilize not only the elements of the exchange complex of CP-rocks (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), but also framework-forming elements (Al, Si). It is shown that Fe and Mn of CP-rocks poorly processed by plants, which results in their local accumulations in soils and creates conditions for hardpan formation along them. Surface wastewater treatment materials based on FOPS® filters are proposed to be used for the localization of HMs from soils, as well as for the reclamation of municipal solid waste landfills and reforestation.

Keywords: FOPS® filters, sorbent recycling, testing culture, zeolite, soil remediation, hardpan, reclamation of MSW landfills

Received 27.10.2021, revised 08.02.2022, accepted for publication 28.03.2022

DOI: 10.18412/1816-0395-2022-6-16-21

Загрязнение территорий городов, а вместе с ними и поверхностного стока тяжёлыми металлами (ТМ), в последнее время приобретает угрожающие размеры [1, 2]. Причиной всеобщей "металлизации" окружающей среды являются не только промышленные выбросы, но и автомобильный транспорт, поставляющий в диспергированном состоянии такие ТМ, как железо, марганец, цинк, медь, кадмий, никель, свинец [3].

Сорбционные технологии очистки поверхностного стока представляются перспективным направлением природоохранной деятельности по причине перевода подвижных форм ТМ в малоподвижные, практически реализуя геоэкологический механизм снижения "металлизации" окружающей среды [3]. Применяя недорогие природные сорбенты (цеолиты, опоки, трепелы и др.) с выраженными способностями геохи-

мических барьеров в отношении ТМ, вполне реально снизить содержание их подвижных форм в водных средах сравнительно малозатратным способом.

Большие объёмы поверхностных сточных вод, а в соответствии с этим и значительные массы извлекаемых подвижных форм ТМ, предполагают и наличие немалых количеств сорбционных материалов, необходимых для их удаления и фиксации. Один из наиболее

практичных подходов к работе с большими объемами сорбционных материалов — использование крупногабаритных фильтрующих контейнеров, заполненных сорбционно-фильтрующими материалами (СФМ), а именно фильтрующими патронами, наиболее оптимальными (по конструкции, цене и опыту практического применения) из которых считаются фильтры ФОПС® [2, 4].

Фильтрующие патроны ФОПС®, являясь одноразовыми изделиями, после исчерпания своего ресурса (примерно 1 год эксплуатации при очистке поверхностного стока с селитбных территорий) и замены их новыми подлежат утилизации на полигонах твёрдых коммунальных отходов (ТКО) в виде пригодного для вторичной переработки пластика и существенных масс отработанных сорбционных материалов. Поскольку сорбционные материалы в фильтрах ФОПС® работают в динамическом режиме и до момента вывода их из эксплуатации отработанные только часть своей сорбционной ёмкости (динамическую ёмкость), то после изъятия и поступления на утилизацию эти материалы сохраняют значительную часть своей общей сорбционной способности (до 40–50 % по массе от максимальной). Это обстоятельство позволяет использовать отработанные материалы из фильтров ФОПС® с целью дополнительного поглощения и фиксации ТМ.

В настоящее время для рекультивации нарушенных в результате хозяйственной деятельности земель (полигоны ТКО, отвалы, карьеры, промплощадки и др.) широко используют искусственные почвогрунты (ПГ) с добавками различных отходов [5, 6].

Природные цеолиты (ПЦ) и, в частности, клиноптилолитовые породы (КП-породы) пригодны в агрокультуре в составе ПГ, в том числе в комбинации с различными отходами [7, 8]. Возможности применения отработанных в процессах очистки вод КП-пород в настоящее время только начинают изучаться [9].

Возможные области использования ПГ с добавкой отработанных в процессах очистки поверхностного стока ПЦ из фильтров ФОПС® представлены на рис. 1.



Рис. 1. Возможные области применения зернистых СФМ на основе ПЦ из фильтров ФОПС®, отработанных при очистке поверхностного стока

Fig. 1. Possibilities of using granular sorption-filtering materials based on natural zeolites (NZ) of used FOPPS® filters for surface runoff treatment

Объекты и методы исследования

Возможность применения отработанных в процессах очистки поверхностного стока цеолитовых сорбционных материалов из фильтров ФОПС® в составе ПГ в открытом грунте оценивали методом фитотестирования с использованием тест-культуры *Raphanus sativus* L. сорта "Французский завтрак" (ФЗ) по методике, описанной в [9].

Семенной материал ("Гавриш", Россия) высаживали в открытый грунт на микроделянках размером 700×500 мм, в которые на глубину 300 мм были внесены ПГ с различными количествами отработанных ПЦ-материалов (КП-порода из фильтра ФОПС®-Ц [4] и её MnO₂-модифицированная форма, применявшаяся ранее для очистки загрязнённого инфильтратом поверхностного стока [2]).

ПГ готовили в объеме 40 дм³ на каждую микроделянку путём добавки отработанных материалов в его основу с содержанием 0, 10, 20 и 40 % от общего состава. Основа

ПГ представляла собой дерново-подзолистую супесчаную почву с низким содержанием органического вещества и гумуса, достаточным количеством подвижных форм азота (156 мг/дм³) и калия (112 мг/дм³) и умеренным содержанием фосфора (210 мг/дм³), оксидов железа (1850 мг/дм³) и марганца (320 мг/дм³). Внешний вид опытных микроделянок в открытом грунте представлен на рис. 2.

Высадку семян редиса ФЗ в субстраты проводили по описанной [9] методике. Температурный режим в период прорастания и вегетации (в общем 50 дней) был одинаков — 17–24 °С, с периодичностью полива два раза в неделю (с учётом дождей) и обязательным рыхлением субстратов. Главные размерные и массовые характеристики редиса ФЗ в данном исследовании были аналогичны описанным нами ранее [9]. Кроме того, на основании измерений массы частей растения (M_п, M_{кп}, M_к) для них определялись индексы толерантности (ИТ) по формуле



Рис. 2. Внешний вид опытных микроделянок с *Raphanus sativus* L. сорта "Французский завтрак"

Fig. 2. Appearance of experimental microplots with *Raphanus sativus* L., "French Breakfast" variety

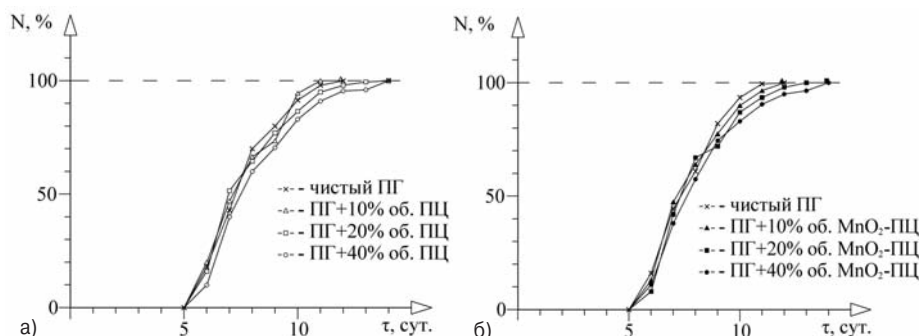


Рис. 3. Зависимость относительного количества проросших семян (N) *Raphanus sativus* L. в открытом грунте на почвенно-грунтовых субстратах с добавками отработанных ПЦ (а) и MnO_2 -ПЦ (б) от времени (τ)

Fig. 3. Relative quantity (N) dependence of germinated seeds of *Raphanus sativus* L. on time (τ) in fields on soil-ground substrates with additives of spent NZ (a) and MnO_2 -NZ (b)

$ИТ = M/M_0$,
где M_0 — масса части растения, выращенного на чистом ПГ, г;
 M — масса той же части растения, выращенного в субстрате с добавкой.

Результаты и их обсуждение

Прорастание редиса ФЗ в открытом грунте началось на 5–6 сутки и закончилось на 11–14

сутки. На рис. 3 представлены изменения общего количества проросших семян (в %) во времени для чистого ПГ и ПГ с добавками отработанных материалов.

Видно, что оба материала (ПЦ и его MnO_2 -модифицированная форма) при добавке их в ПГ практически не вызывают задержки всхожести семян по сравнению с чистым ПГ.

На рис. 4 приведены зависимости длины корешков (l_k), отношения длины корнеплода к его диаметру ($l_{кп}/d_{кп}$) и отношения массы побегов к массе корнеплода ($M_n/M_{кп}$) от содержания отработанных материалов в составе ПГ.

Как следует из рис. 4, зависимости для ПГ с добавлением обоих отработанных материалов имеют одинаковый характер, близкий к тому, что был отмечен в случае закрытого грунта [9]. Однако значение $l_{кп}/d_{кп}$ постоянно и близко к 2, в отличие от полученных для открытого грунта [9], где оно составляло 15,3 для чистого ПГ и 7,1–7,8 для ПГ с добавками отработанных материалов. Данные исследования подтверждают вывод работы [9] о том, что увеличение количества отработанных ПЦ приводит к стимулированию роста корневой системы редиса, а отношение $M_n/M_{кп}$ при этом снижается.

Зависимости индексов толерантности (ИТ) от содержания отработанных материалов в ПГ (рис. 5) также подтверждают вышесказанное и данные работы [9] для закрытого грунта.

Поскольку ПЦ применяют в основном для удаления ТМ из различных водных сред, то вопрос о содержании ТМ в отработанных после водоочистки материалах весьма актуален. В табл. 1 даны результаты определения содержания ТМ в отработанной КП-породе Бадинского месторождения (Забайкалье) и её MnO_2 -модифицированной форме после очистки ими поверхностного стока с селитебной территории г. Санкт-Пе-

Таблица 1. Содержание ТМ в отработанных после водоочистки материалах на основе КП-пород

Table 1. Heavy metals content in clinoptilolite rocks (CP-rocks) based materials spent after water treatment

Определяемый ТМ	Содержание ТМ, мг/кг				ПДК, мг/кг	
	КП-порода		MnO_2 -КП-порода		Почва	ОСВ*
	исходная	отработанная	исходная	отработанная		
Fe	4 740	9 900	3 980	13 670	Нет	Нет
Mn	465	510	2 790	2 860	1500	Нет
Zn	48,5	80,3	18,7	73,8	55–220	220
Ni	11,8	19,8	3,2	15,3	20–80	Нет
Pb	20,6	28,1	12,2	26,4	32–130	130
Cd	0,24	0,30	0,11	0,18	0,50–2,00	2,00

*ОСВ – осадок сточных вод (по ГОСТ 54651).

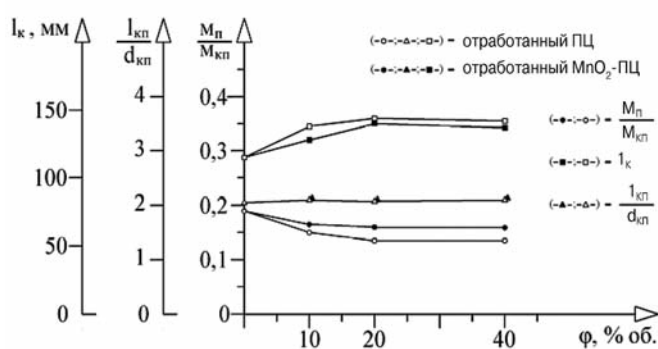


Рис. 4. Зависимость размерно-массовых характеристик отдельных частей *Raphanus sativus* L. от объемной доли отработанных материалов (ϕ) в ПГ

Fig. 4. Dimensional-mass parameters dependence of *Raphanus sativus* L. particles on the volume ratio of waste materials (ϕ) in artificial soils

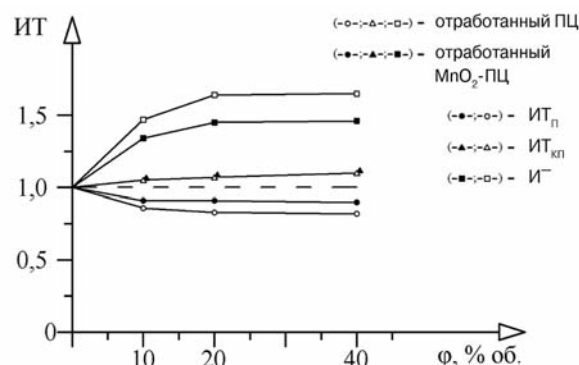


Рис. 5. Зависимость индексов толерантности отдельных частей *Raphanus sativus* L. от объемной доли отработанных материалов (ϕ) в ПГ

Fig. 5. Dependence of tolerance parameters of *Raphanus sativus* L. particles on the volume ratio of waste materials (ϕ) in artificial soils

тербурга (1 год непрерывной эксплуатации в составе фильтров ФОПС®).

Из табл. 1 видно, что содержание токсичных ТМ (Cd, Pb, Ni) невелико и не превышает предельно допустимые концентрации (ПДК) их в почвах и осадках сточных вод, используемых в агрокультуре [10]. Содержание Zn несколько выше (относительно ПДК в почве), однако он является биофильным микроэлементом питания растений и требуется в составе питательных добавок в ПГ.

Содержание почвообразующих оксидов Fe и Mn в отработанных материалах хотя и высокое, однако не нормируется в почвах и осадках. С другой стороны, выявленное содержание оксидов Fe и Mn существенно ниже, чем их концентрации в ортштейновых образованиях, являющихся, как известно, важным элементом генезиса подзолистых почв [11]. В настоящее время известно [12, 13], что эти оксиды в почвах выступают в качестве геохимического барьера (ГХБ) сорбционного типа, на котором осаждаются различные ТМ. Эти же способности обнаружены у океанических и пресноводных Fe-Mn-конкреций [14]. Внесение в почвы отработанных в процессах очистки поверхностных сточных вод материалов на основе ПЦ из фильтров ФОПС® может приводить к удалению и фиксации на них ТМ по механизму ортштейнообразования, что важно при проведении ремедиации загрязнённых ТМ почв.

Стимулируя развитие корневой системы растений, ПЦ являются ещё и источником жизненно важных элементов питания, поскольку ионы, находящиеся в обменном комплексе ПЦ (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , Zn^{2+} и др.), доступны для перехода в почвенные растворы и легко усваиваются корневой ризодермой растений.

Для почв, бедных элементами питания, роль ПЦ как источников минерального питания проявляется наиболее ярко. В табл. 2 представлен оксидный состав КП-породы до и после длительного (в течение 2-х лет) контакта с корневой системой растения *Chlorophytum comosum* Thunb., а на рис. 6 приведены электронно-микроскопические изображения поверхности и структуры КП-породы до и после контакта.

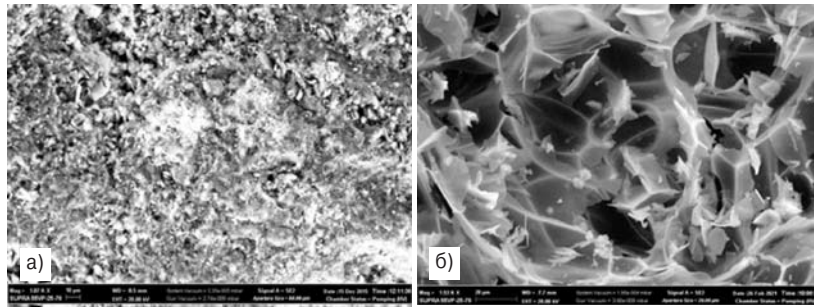


Рис. 6. Структуры КП-породы (Бадинское месторождение) до (а) и после (б) длительного контакта с корневой системой растения *Chlorophytum comosum* Thunb. при одинаковом увеличении

Fig. 6. Structures of CP-rock (Badinskoye deposit) before (a) and after (b) prolonged contact with the roots of *Chlorophytum comosum* Thunb. at the same magnification

Таблица 2. Состав породообразующих оксидов КП-породы до и после контакта с корневой системой растения *Chlorophytum comosum* Thunb., % по массе

Table 2. Composition of CP-rock forming oxides before and after contact with the roots of *Chlorophytum comosum* Thunb., wt %

Образцы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MnO ₂	SiO ₂ / Al ₂ O ₃
До контакта	77,78	12,27	0,21	0,56	1,22	0,13	6,71	1,03	0,05	5,58
После контакта	76,78	11,67	0,20	0,38	1,74	0,70	3,73	4,54	0,25	5,79
Изменение, %	-1,3	-4,9	-4,8	-32	+43	+438	-44	+341	+400	+3,8

Данные табл. 2 демонстрируют, что растение *Chlorophytum comosum* Thunb. поглощало практически все оксиды КП-породы, включая каркасные SiO₂ и Al₂O₃, которые потреблялись им в одинаковой степени (отношение их практически не изменилось). Предпочтительными в усвоении КП-породы были Ca, K и Mg, в отличие от Na, Fe и Mn, что привело к значительному росту содержания последних. Обособление фазы оксидов Fe и Mn при взаимодействии с корневой системой растения — важный фактор запуска процесса ортштейнообразования в почвах.

Структуры КП-породы до и после взаимодействия с корневой

системой значительно отличаются. Если исходная КП-порода (рис. 6, а) имеет плотную сцементированную структуру с макропорами размером не более 5 мкм, то материал после контакта с корневой системой (рис. 6, б) — это композиция из тонкослойных чешуек с гладкой поверхностью, образующая некое подобие каркаса с условными порами более 50 мкм. Кажущаяся плотность исходной КП-породы уменьшилась после контакта примерно в 10 раз (с 1,48 до 0,14 г/см³), что свидетельствует о значительном потреблении материала растением в качестве источника минерального питания (рис. 7).

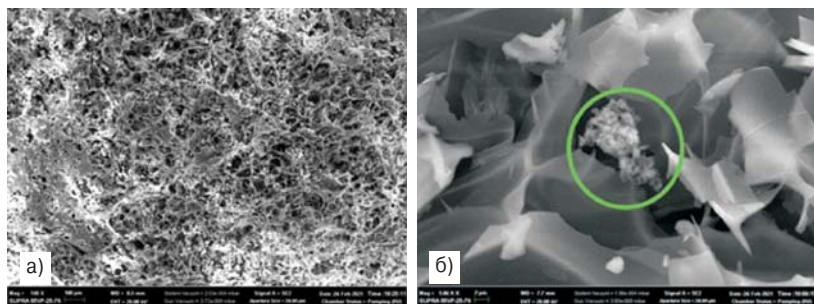


Рис. 7. Структура отработанной КП-породы после её длительного контакта с корневой системой растения *Chlorophytum comosum* Thunb.: а – губчатая макроструктура; б – микроструктура с включением аморфного SiO₂ (в выделенной области)

Fig. 7. Structure of spent CP-rock after prolonged contact with the roots of *Chlorophytum comosum* Thunb.:

a – sponge macrostructure; b – microstructure with inclusion of amorphous SiO₂ (in selected area)



Рис. 8. Крапива (а) и злаковые травы (б), выросшие на шихте отработанных после водоочистки фильтров ФОПС® с загрузкой из КП-породы
Fig. 8. Appearance of nettle (a) and cereal grasses (b) grown on the charge of used after water treatment FOPS® filters with the loading based on CP-rocks

Видно, что основная масса оставшейся КП-породы имеет гладкую "леденчоподобную" поверхность, однако в образовавшемся пространстве макропор наблюдаются микроагрегаты аморфного SiO₂ (который входит в изначальный состав КП-пород), не потребляемые корневой системой.

Следует отметить, что в КП-породах, представляющих собой "кремниевые удобрения" [15], доступность кремния для корневой системы растений существенно выше, чем, например, в кристаллических алюмосилика-

тах (полевых шпатах), в основном формирующих почвы.

Растения, для роста которых требуется значительное количество кремния, прекрасно растут даже на отработанных КП-породах без наличия ПГ, формируя разветвлённую корневую систему в шихте отработанных цеолитовых фильтров ФОПС®.

На рис. 8 показаны фильтры ФОПС®, на отработанной шихте которых проросли семена таких растений (крапива и злаковые травы), попавшие в фильтры с поверхностным стоком.

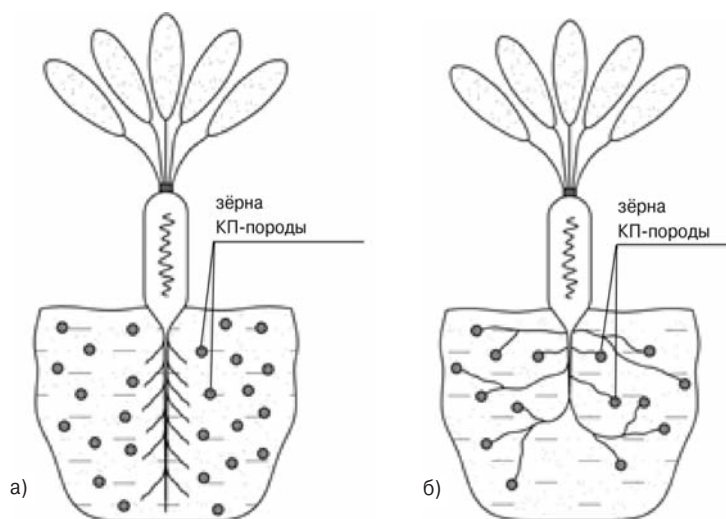


Рис. 9. Схема развития корневой системы *Raphanus sativus* L. в ПГ с 20 % об. КП-породы при нормальном (а) и недостаточном (б) орошении
Fig. 9. Scheme of roots development of *Raphanus sativus* L. in artificial soils with 20 % volume content of CP-rocks under normal (a) and insufficient (b) irrigation

Таким образом, для обеспечения роста травяных культур можно использовать ПГ с добавками отработанных в процессах водоочистки материалов на основе КП-пород из фильтров ФОПС®, что особенно важно для экономии почвенных ресурсов при проведении рекультивационных мероприятий полигонов отходов, отвалов и др.

Установлено, что ПЦ обладают уникальной влагоудерживающей способностью, которая может быть полезна в засушливые периоды. Частицы КП-пород, обладая высокой (до 13 % по массе) и очень сильной влагоудерживающей способностью, служат некими микрорезервуарами, запасующими влагу и способными медленно отдавать её растениям. При этом корневая система растений адаптируется к структуре почвы с расположенными в ней зёрнами КП-породы (рис. 9). Добавка материалов на основе отработанных КП-пород увеличивает засухоустойчивость растений. В эксперименте с тест-культурой *Raphanus sativus* L. по методике [9] в условиях чередования засушливых и орошаемых периодов (по 10 сут) биомасса растений на ПГ с добавкой 20 % об. отработанной КП-породы, по сравнению с контрольным дерново-подзолистым ПГ, увеличилась почти в 20 раз (при изначально одинаковых всхожести семян и периоде начала роста растений).

Выводы

1. Сорбционно-фильтрующие материалы из фильтров ФОПС® на основе природных цеолитов в процессе очистки поверхностного стока с селитебных территорий накапливают различные количества ТМ в концентрациях, не превышающих ПДК этих ТМ в почвах и осадках сточных вод, используемых в качестве добавок в сельскохозяйственные почвы.

2. Методом фитотестирования в открытом грунте установлено, что добавки отработанных материалов на основе клиноптилолитовых пород из фильтров ФОПС® в концентрациях не более 20 % об. в почвогрунт оказывают стимулирующее воздействие на развитие корневой системы тест-культуры *Raphanus sativus* L.

3. Обнаружено, что корневая система растений утилизи-

рует не только элементы обменного комплекса клиноптилолитовой породы (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), но и каркасообразующие (Si и Al), что позволяет рассматривать отработанные материалы на основе клиноптилолитовых пород из фильтров ФОПС® как источник мине-

рального (в том числе и кремниевое) питания.

4. Выявлено, что Fe и Mn из отработанных материалов на основе клиноптилолитовых пород из фильтров ФОПС® утилизируются растениями незначительно, что приводит к их локальному накоплению, создающему благопри-

ятные условия для запуска процесса ортштейнообразования в подзолистых почвах.

5. Добавка в почвогрунт отработанных материалов на основе клиноптилолитовых пород из фильтров ФОПС® увеличивает засухоустойчивость тест-культуры *Raphanus sativus* L.

Литература

1. Huber M., Welker A., Helmreich B. Critical review of heavy metal pollution of traffic area runoff: Occurrence, influencing factors, and partitioning. *Science of Total Environment*. 2016. V. 541. P. 895–919.
2. Ватин Н.И. и др. Тестовая эксплуатация фильтра ФОПС® с природным цеолитом для очистки загрязнённого инфильтратом поверхностного стока. Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 9. С. 39–49.
3. Алексеев В.А. Геоэкология: экологическая геохимия: учебник. Изд. 2-е, переработ. Ростов н/Д, Феникс, 2017. 685 с.
4. Чечевичкин А.В. Проектирование и применение локальных очистных сооружений поверхностного стока на основе фильтров ФОПС®. СПб., Любавич, 2017. 176 с.
5. Байкенова Ю.Г., Байкин Ю.Л. Эффективность технологий экогеохимической рекультивации почв (ТЭРП), загрязнённых тяжёлыми металлами (ТМ). *Аграрный вестник Урала*. 2015. № 4 (134). С. 10–14.
6. Кузнецова Л.М., Михайлов А.В., Селеннов В.Г. Искусственные почвенные грунты. *Вестник ТГПУ*. 2009. № 3 (80). С. 145–150.
7. Убугунов Л.Л., Меркушева М.Г., Кожевникова Н.М. Агрохимическое минеральное сырьё: природные цеолиты. Улан-Удэ, изд-во БНЦ СО РАН, 2012. 444 с.
8. Арефьев А.Н., Кузина Е.Е., Кузин Е.Н. Изменение физико-химических свойств лугово-чернозёмной почвы и продуктивности звена зернопропашного севооборота под влиянием осадка сточных вод и цеолита. *Нива Поволжья*. 2017. № 1 (42). С. 9–15.
9. Фёдоров М.П. и др. Применение отработанных сорбентов очистки поверхностных сточных вод для интенсификации роста растений. *Экология и промышленность России*. 2021. Т. 25. № 7. С. 26–31.
10. Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения. М., Инф.-изд. центр Минздрава России, 1997. 54 с.
11. Зайдельман Ф.Р., Никифорова А.С. Генезис и диагностическое значение новообразований почв лесной и лесостепной зон. М., изд-во МГУ, 2001. 216 с.
12. Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Власов Д.В. Факторы накопления тяжёлых металлов и металлоидов на геохимических барьерах в городских почвах. *Почвоведение*. 2015. № 5. С. 536–553.
13. Тимофеева Я.О., Голов В.И. Аккумуляция микроэлементов в ортштейнах почв (обзор литературы). *Почвоведение*. 2010. № 4. С. 434–440.
14. Мартынова М.В. Формы нахождения марганца их содержание и трансформация в пресноводных отложениях (аналитический обзор). *Экологическая химия*. 2012. № 21(1). С. 38–52.
15. Куликова А.Х. Кремний и высококремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур. Ульяновск, изд-во Ульяновской ГСХА им. П.А. Столыпина, 2013. 176 с.

References

1. Huber M., Welker A., Helmreich B. Critical review of heavy metal pollution of traffic area runoff: Occurrence, influencing factors, and partitioning. *Science of Total Environment*. 2016. V. 541. P. 895–919.
2. Vatin N.I. i dr. Testovaya ekspluatatsiya fil'tra FOPS® s prirodnyim tseolitom dlya ochistki zagryaznennogo infiltratom poverkhnostnogo stoka. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. 2017. № 9. S. 39–49.
3. Alekseev V.A. Geoekologiya: ekologicheskaya geokhimiya: uchebnik. Izd. 2-e, pererabot. Rostov n/D, Feniks, 2017. 685 s.
4. Chechevichkin A.V. Proektirovanie i primenenie lokal'nykh ochistnykh sooruzhenii poverkhnostnogo stoka na osnove fil'trov FOPS®. Spb., Lyubavich, 2017. 176 s.
5. Baikenova Yu.G., Baikin Yu.L. Effektivnost' tekhnologii ekogeokhimicheskoi rekul'tivatsii pochv (TERP), zagryaznennykh tyazhelyimi metallami (TM). *Agrarnyi vestnik Urala*. 2015. № 4 (134). S. 10–14.
6. Kuznetsova L.M., Mikhailov A.V., Selenov V.G. Iskusstvennye pochvennye grunty. *Vestnik TGPU*. 2009. № 3 (80). S. 145–150.
7. Ubugunov L.L., Merkusheva M.G., Kozhevnikova N.M. Agrokhimicheskoe mineral'noe syr'e: prirodnye tseolity. Ulan-Ude, izd-vo BNTs SO RAN, 2012. 444 s.
8. Arefev A.N., Kuzina E.E., Kuzin E.N. Izmenenie fiziko-khimicheskikh svoystv lugovo-chernozemnoi pochvy i produktivnosti звена зернопропашного севооборота под влиянием осадка сточных вод и цеолита. *Niva Povolzh'ya*. 2017. № 1 (42). S. 9–15.
9. Fedorov M.P. i dr. Primenenie otrabotannykh sorbentov ochistki poverkhnostnykh stochnykh vod dlya intensivatsii rosta rastenii. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2021. T. 25. № 7. S. 26–31.
10. Gigenicheskie trebovaniya k ispol'zovaniyu stochnykh vod i ikh osadkov dlya orosheniya i udobreniya. M., Inf.-izd. tsentr Minzdrava Rossii, 1997. 54 s.
11. Zaidel'man F.R., Nikiforova A.S. Genезis i diagnosticheskoe znachenie novoobrazovaniy pochv lesnoi i lesostepnoi zon. M., izd-vo MGU, 2001. 216 s.
12. Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Vlasov D.V. Faktory nakopleniya tyazhelykh metallov i metalloidov na geokhimicheskikh bar'erakh v gorodskikh pochvakh. *Pochvovedenie*. 2015. № 5. S. 536–553.
13. Timofeeva Ya.O., Golov V.I. Akkumulyatsiya mikroelementov v ortshainakh pochv (obzor literatury). *Pochvovedenie*. 2010. № 4. S. 434–440.
14. Martynova M.V. Formy nakhozhdeniya margantsa ikh sodержanie i transformatsiya v presnovodnykh otlozheniyakh (analiticheskii obzor). *Ekologicheskaya khimiya*. 2012. № 21(1). S. 38–52.
15. Kulikova A.Kh. Kremnii i vysokokremnistye породы v sisteme udobreniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur. Ul'yanovsk, izd-vo Ul'yanovskoi GSKhA im. P.A. Stolypina, 2013. 176 s.

V.I. Maslikov – dr. techn. nauk, professor, Vysshaya shkola gidrotekhnicheskogo i energeticheskogo stroitel'stva Inzhenerno-stroitel'nogo instituta Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta Petra Velikogo (VShGiЭС ИСИ СПбГУ), e-mail: maslikov_vi@spbstu.ru • A.V. Chechevichkin – инженер-исследователь, VShGiЭС ИСИ СПбГУ, e-mail: chechevichkin_av@spbstu.ru • V.N. Chechevichkin – заведующий лабораторией, VShGiЭС ИСИ СПбГУ, e-mail: chechevichkin_vn@spbstu.ru • Л.А. Якунин – инженер-исследователь, VShGiЭС ИСИ СПбГУ, e-mail: yakunin_la@spbstu.ru

V.I. Maslikov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Higher School of Hydrotechnical and Energy Construction of the Engineering and Construction Institute of Saint Petersburg Polytechnic University named after Peter the Great (HSHEC ECS SPbU), e-mail: maslikov_vi@spbstu.ru • A.V. Chechevichkin – Researcher, HSHEC ECS SPbU, e-mail: chechevichkin_av@spbstu.ru • V.N. Chechevichkin – Laboratory Chief, HSHEC ECS SPbU, e-mail: chechevichkin_vn@spbstu.ru • L.A. Yakunin – Researcher, HSHEC ECS SPbU, e-mail: yakunin_la@spbstu.ru