

УДК 628.35

**И.С. Щукин, М.А. Авдеева,
А.А. Галкина, Я.С. Луферчик**

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

ВЫБОР РАСТЕНИЙ ДЛЯ ФИТОФИЛЬТРОВ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Растения являются одним из основных элементов фитофильтров для очистки поверхностных сточных вод. Растения в фитофильтрах служат для восстановления пропускной способности фильтрующей загрузки, а также для поглощения загрязняющих веществ, содержащихся в поверхностном стоке. В статье рассмотрены механизмы поглощения растениями загрязнений, содержащихся в ливневых сточных водах: нефтепродукты, тяжелые металлы, соединения азота и фосфора, механизмы поглощения воды и транспирации. На основании литературного анализа выделены основные виды растений, удовлетворяющие требованиям для фитофильтров: древесные растения рода ива козья (*Salix caprea*) и ива белая (*Salix alba*); травянистые растения рода осоки (*Carex*) и растения, традиционно применяемые для устройства газонов: овсяница красная (*Festuca rubra*) и луговая (*Festuca pratensis*), мятлик луговой (*Poa pratensis*), клевер ползучий (*Trifolium repens*) и луговой (*Trifolium pratense*), райграс пастбищный (*Lolium perenne*).

Ключевые слова: поверхностный сток, фитофильтры, тяжелые металлы, нефтепродукты.

Исследование качественного состава поверхностного стока с урбанизированных территорий, проведенное авторами, показывает высокий уровень его загрязненности четырьмя группами веществ: взвешенные вещества, нефтепродукты, органические вещества и тяжелые металлы (таблица) [1].

Перспективным направлением развития систем очистки поверхностного стока во всем мире считаются биоинженерные сооружения. Они сочетают в себе значительную эффективность, низкую стоимость и высокую экологичность строительства и эксплуатации. Из всего перечня сооружений этой группы, применяемых для очистки поверхностного стока, наиболее универсальными сооружениями, оказывающими комплексное воздействие на качественные и количественные показатели поверхностного стока, признаются фитофильтры [2].

Фитофильтр для очистки ливневых сточных вод (рис. 1) представляет собой пониженный участок территории, засыпанный фильтрующей загрузкой высотой 0,5–1,0 м и засаженный растительностью. Во время дождя над поверхностью фильтра может образовываться

слой воды высотой 0,4–0,5 м, который будет существовать в течение нескольких часов после прекращения дождя, до полного впитывания.

Качественный состав поверхностного стока
с территорий некоторых городов России

Город	Пермь	Волгоград	Самара	Санкт-Петербург	Международный обзор	ПДК р.х.	
Взвешенные вещества, мг/л	352–11642	420–1250	50–1450	300–600	150	+0,25 к фону	
Нефтепродукты, мг/л	0,46–9,93	0,75–3	0,125–475	7–12	–	0,05	
Органические вещества	БПК, мг/л	68–326 (ХПК)	39,2–118,5	5,2–316	20–50	–	3
	Азот аммонийный, мг/л	0,4–1	0,45–2,08	3,8–11,2	8–10	2,10	0,39
Тяжелые металлы	Cd, мг/л	0,003–0,041	–	0–0,05	–	0,0045	0,005
	Pb, мг/л	0,36–0,58	–	–	–	0,14	0,1
	Zn, мг/л	0,016–0,075	0,04	0–0,035	–	0,25	0,01
	Cu, мг/л	0,09–0,26	0,22	0–0,58	–	0,05	0,001
	Ni, мг/л	0,15–0,27	–	0,00	–	0,03	0,01
	Al, мг/л	0,07–0,45	–	0–0,1	1–6	–	0,04
Cr, мг/л	0,07–0,35	–	0–0,065	–	0,03	0,001	

Одним из основных элементов фитофильтров является растительность. При выборе растений особое внимание стоит уделять условиям, в которых находятся растения фитофильтра. Применяемые растения должны быть приспособлены к климатическим особенностям территории, чередованию сухих и влажных периодов, а также быть устойчивыми к токсичным веществам, присутствующим в стоке урбанизированных территорий (нефтепродукты, тяжелые металлы).

Растительность служит в первую очередь для поддержания пропускной способности фильтрующей загрузки за счет роста корней, а также их отмирания и разложения с образованием на их месте пустот [3]. Однако не все растения способны эффективно восстанавливать пропускную способность. Так, в работе [4] показано, что растения с

тонкими длинными корнями образуют развитый «каркас», дополнительно скрепляющий почву. Растения же с толстыми корнями, наоборот, раздвигают почву, что способствует образованию макропор.

Кроме того, растения участвуют в биологическом поглощении из почвы соединения азота и фосфора, содержащихся в ливневых водах, которые служат для них основными питательными элементами. В полевых условиях непосредственным источником питательных ионов для растений служит почвенный раствор. Также растения способны усваивать ионы, поглощенные коллоидами. Более того, растения активно воздействуют на твердую фазу почвы, переводя необходимые питательные вещества в доступную форму.

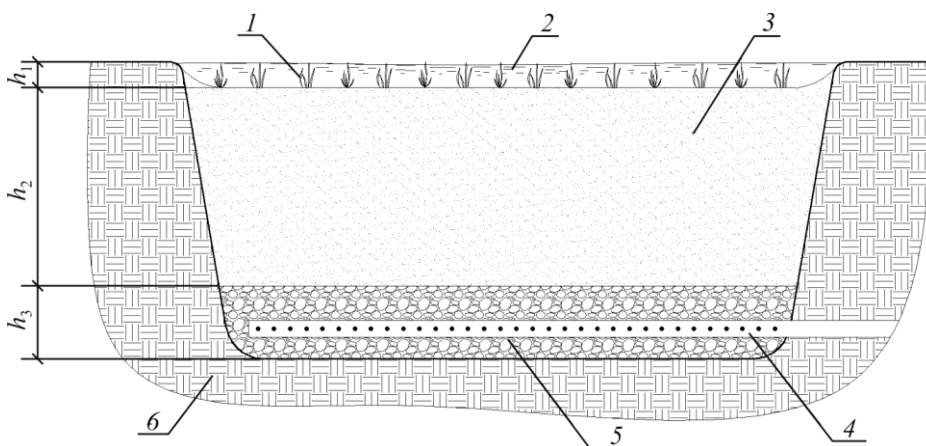


Рис. 1. Схема фитофильтра: 1 – растительность; 2 – слой воды; 3 – загрузка; 4 – дренажная система; 5 – дренажный слой; 6 – окружающий грунт; 7 – водонепроницаемый материал (опционально); h_1 – высота слоя воды; h_2 – высота загрузки; h_3 – высота дренажного слоя

Фосфор поглощается растениями через корневую систему и поступает в виде окисленных соединений (H_2PO_4 , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}). Физиологическое значение фосфора определяется тем, что он входит в состав ряда органических соединений, таких как нуклеиновые кислоты (ДНК и РНК), нуклеотиды, фосфолипиды, витамины и другие, играющие определяющую роль в обмене веществ. Фотосинтез, дыхание, рост требуют для нормального протекания достаточного снабжения фосфором.

Азот поглощается растениями из почвы в виде аниона NO_3 и катиона NH_4^+ . Корневые системы растений хорошо усваивают нитраты, которые, поступая в корни растения, подвергаются ферментативному

восстановлению до нитритов и далее до аммиака. Этот процесс происходит преимущественно в корнях, однако клетки листьев тоже обладают этой способностью.

В растении соединения азота и фосфора распределяются с водным током по проводящим сосудам древесины, пронизывающим корни, стебли и листья

Участвуют растения и в поглощении тяжелых металлов, содержащихся в ливневых водах. По механизму взаимодействия с тяжелым металлом растения принято разделять на две группы: растения-исключатели и растения-аккумуляторы. Наиболее распространена стратегия «исключения». В этом случае устойчивые к тяжелым металлам растения используют механизмы ограничения поглощения тяжелых металлов, что приводит к существенному снижению их поступления в ткани растения. Основным барьером на пути транспорта тяжелых металлов в надземные органы является корневая система. Противоположная стратегия основана на том, что устойчивые виды растений способны нормально существовать с повышенным содержанием в их клетках, тканях и органах тяжелых металлов благодаря активному образованию металлосвязывающих веществ, субклеточной компартментации или изменению метаболизма. Очевидно, что для фитофильтров больше подходят растения, действующие по механизму поглощения тяжелых металлов.

Поглощение тяжелых металлов растениями происходит корневым путем и включает в себя два процесса: 1) пассивный (неметаболический) – перенос ионов в клетку в соответствии с градиентом их концентрации; 2) активный (метаболический) – процесс поглощения клеткой против градиента концентрации [5]. Первые этапы поглощения тяжелых металлов корневой системой неспецифичны. Они осуществляются посредством физико-химической адсорбции. Следующие этапы связаны с затратой энергии и сопровождаются избирательным поглощением тяжелых металлов из раствора. Соотношение пассивного и активного механизмов поступления тяжелых металлов в растительный организм во многом зависит от их концентрации в почве и от физиологической функции. При наличии во внешней среде высоких концентраций металлов поглощение носит преимущественно неметаболический характер и является результатом их диффузии в свободное пространство корня.

Распределение тяжелых металлов в различных органах растений показано на рис. 2 [6].

Существенное влияние на поступление металлов в растения оказывают физико-химические свойства почвы: тип почвы, ее химический и механический составы, рН, содержание органического вещества и др. [7], что обуславливает дополнительные требования к составу фильтрующей загрузки.

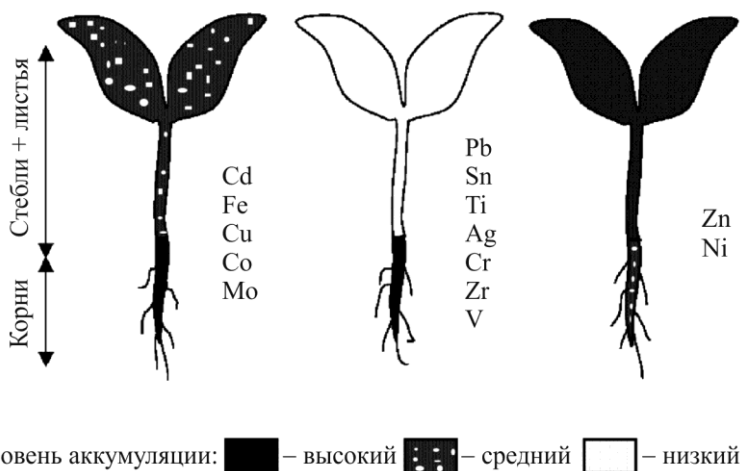


Рис. 2. Распределение тяжелых металлов в различных органах растений

Согласно исследованиям, проведенным *T.M. Muthanna, M. Viklander* и др. [8], доля тяжелых металлов, поглощаемых растениями, находится в диапазоне 5–10 %. Тем не менее нужно отметить косвенное участие растений в извлечении тяжелых металлов: корневая система растений является средой для развития микроорганизмов биопленки, активно участвующей в поглощении, трансформации и деградации загрязняющих веществ, в том числе растворенных металлов [9].

Основным способом деградации нефти у растений является ризодеградация, при которой корневая система способствует развитию ризосферной микробиоты, синтезирует и выделяет ферменты, активизирующие рост микроорганизмов-деструкторов, которые утилизируют наиболее доступные фракции углеводородов. Рост корней создает благоприятный воздушный режим в почве, что способствует окислению некоторых компонентов нефтепродуктов. Результаты исследований фиторемедиации почв, загрязненных нефтепродуктами, показали, что выращивание растений на нефтезагрязненной почве способствовало увеличению деструкции нефти на 35–39 % [10].

Также важно отметить влияние растений на водный баланс системы. Некоторое количество поступившей в фитофильтр воды потребляется на питание растений, часть вод путем транспирации удаляется из системы, таким образом снижается общее количество стока от фитофильтра.

Основным органом поглощения воды растениями также является корневая система, представляющая собой сложный орган с хорошо дифференцированной внешней и внутренней структурой. Его роль прежде всего заключается в том, что благодаря огромной поверхности обеспечивается поступление воды в растение из большего объема почвы. Распределение корней по горизонтам почвы часто определяется распределением воды в ней. Обычно в первый период жизни растительного организма корневая система растет интенсивно и скорее достигает более влажных слоев. Растения имеют различную корневую систему; так, у некоторых растений корневая система проникает на большую глубину, у других распространяется в ширину.

Важное значение для развития корневых систем имеет аэрация почвы. Недостаток кислорода является причиной плохого развития корневых систем на заболоченных почвах. Растения, приспособленные к росту на плохо аэрируемых почвах, имеют в корнях систему межклетников, которые вместе с межклетниками в стеблях и листьях составляют единую вентиляционную систему.

Процесс транспирации активно происходит в губчатой ткани листа. Водяной пар по межклетникам проходит к устьицам и испаряется через них. Устьица расположены на внутренней стороне листа, что обеспечивает меньшую потерю воды листом. Транспирация у растений регулируется открыванием и закрыванием устьиц. Если растениям достаточно воды, то устьица открыты днем и ночью. При недостатке воды устьица закрываются. Интенсивность транспирации – это количество воды, испаряемой растением (в граммах) за единицу времени (в часах) единицей поверхности (в дециметрах квадратных). Эта величина колеблется в диапазоне от 0,15 до 1,5.

В качестве растений в фитофилтре могут быть использованы как древесные растения, так и травянистые, а также их сочетания.

Среди древесных растений можно выделить род ива (*salix*), насчитывающий более 370 видов. Ива широко используется при ремедиации почв, загрязненных антропогенными примесями. Большинство видов ив устойчиво растут на влажных почвах, что важно для фито-

фильтров. Наибольшей способностью к поглощению тяжелых металлов обладают ива козья (*Sálìx cáprea*) и ива белая (*Sálìx álba*) [11].

Среди травянистых растений нужно отметить род осоки (*Cárex*). Осоки отличаются неприхотливостью, что обуславливает широкий ареал их распространения – они встречаются во всех климатических зонах всего земного шара. Большинство видов осоки предпочитают влажные места обитания – берега озер и рек, пруды, болота. Осоки способны аккумулировать в себе нефтепродукты и тяжелые металлы, интенсивно поглощают биогенные элементы. Кроме того, осоки обладают декоративными свойствами, в связи с чем находят широкое применение в ландшафтном дизайне.

Также видится перспективным применение растений, получивших широкое применение в качестве газонных трав, например: овсяница красная (*Festuca rubra*) и луговая (*Festuca pratensis*), мятлик луговой (*Poa praténsis*), клевер ползучий (*Trifolium repens*) и луговой (*Trifolium praténse*), райграс пастбищный (*Lolium perenne*). Данные растения отличаются высокой аккумулирующей способностью по отношению к тяжелым металлам и стойкостью к антропогенным примесям, устойчивы к внешним воздействиям, морозоустойчивы, в связи с этим получили широкое применение для устройства газонов на урбанизированных территориях как в составе смесей, так и по отдельности. Однако неизвестно влияние газонных трав на изменение фильтрующей способности почв, так как есть опасения, что газонные травы могут образовать в верхнем слое почвы развитый каркас, уплотняющий ее.

Библиографический список

1. Щукин И.С., Мелехин А.Г. Анализ существующих биоинженерных сооружений очистки поверхностного стока и возможности их применения в условиях Западного Урала // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Строительство и архитектура. – 2013. – № 2. – С. 40–51.
2. Hatt B.E., Fletcher T.D., Deletic A. Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale // Journal of Hydrology. – 2009. – № 365 (3–4). – P. 310–321.
3. Archer A.N.L., Quniton J.N., Hess T.M. Below – ground relationships of soil texture, roots and hydraulic conductivity in two-phase mosaic vegetation in South-east Spain // Journal of Arid Environments. – 2002. – vol. 52. – P. 535–553.

4. Жуйкова Т.В. Реакция ценопопуляций и травянистых сообществ на химическое загрязнение среды: дис. д-ра биол. наук. – Екатеринбург, 2009. – С. 17–21.
5. Устойчивость растений к тяжелым металлам / А.Ф. Титов, В.В. Таланова, Н.М. Казнина, Г.Ф. Лайдинен // Ин-т биологии КарНЦ РАН. Петрозаводск, 2007.
6. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение. – Новосибирск, Наука. Сиб. отд-ние, 1991. – 151 с.
7. Snowmelt pollutant removal in bioretention areas / Т.М. Muthanna, М. Viklander, G.T. Blecken, S.T. Thorolfsson // *Water Research*. – 2007. – № 41 (18). – P. 4061–4072.
8. Davis A.P., Shokouhian M., Sharma H., Minami C., Winogradoff D. Water quality improvement through bioretention: Lead, copper, and zinc removal // *Water Environment Research*. – 2003. – № 75(1). – P. 73
9. Степанова А.Ю., Орлова Е.В. Оценка эффективности использования растений Райграса (*Lolium Perenne* L.) и Люцерны (*Medicago Sativa* L.) для фиторемедиации нефтезагрязненного грунта // Ученые записки Орловского государственного университета. Сер.: Естественные, технические и медицинские науки. – 2012. – № 3. – С. 327–330
10. Иванова Н.А., Шарф Н.А. Особенности поглощения и миграции тяжелых металлов в органах растений в условиях Среднего Приобья // Вестник YUNE. – 2011. – № 2. – С. 3–5.

References

1. Shchukin I.S., Melekhin A.G. Analiz sushchestvuiushchikh bioinzhenernykh sooru-zhenii ochistki poverkhnostnogo stoka i vozmozhnosti ikh primeneniia v usloviakh Zapadnogo Urala [The analysis of current bioengineering stormwater treatment facilities and feasibility of its operation on the West Ural]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2013, no. 2, pp. 40–51.
2. Hatt B. E., Fletcher T. D., Deletic A. Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale. *Journal of Hydrology*, 2009, no 365 (3-4), pp. 310–321.
3. Archer A.N.L., Quniton J.N., Hess T.M. Below – ground relationships of soil texture, roots and hydraulic conductivity in two-phase mosaic vegetation in South-east Spain. *Journal of Arid Environments*, 2002, vol. 52, pp. 535–553.

4. Zhuikova T.V. Reaktsiia tsenopoliatsii i travianistykh soobshchestv na khimicheskoe zagriaznenie sredy [Reaction cenopopulation and herbaceous assemblages on chemical contamination of medium]: *dissertatsiia doktora biologicheskikh nauk*. Ekaterinburg, 2009, pp. 17–21.

5. Titov A.F., Talanova V.V., Kaznina N.M., Laidinen G.F. Ustoichivost' rastenii k tiazhelym metallam [Stability of plants to heavy metals]. *Institut biologii Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*. Petrozavodsk, 2007.

6. П'ин V.B. Tiazhelye metally v sisteme pochva-rastenie [Heavy metals in system bedrock-plant]. Novosibirsk: Nauka (Sibirskoe otdelenie), 1991, 151 p.

7. Muthanna T.M., Viklander M., Blecken G.T., Thorolfsson S.T. Snowmelt pollutant removal in bioretention areas. *Water Research*. 2007, no. 41(18), pp. 4061–4072.

8. Davis A. P., Shokouhian M., Sharma H., Minami C., Winogradoff D. Water quality improvement through bioretention: Lead, copper, and zinc removal. *Water Environment Research*, 2003, no. 75(1), p. 73.

9. Stepanova A.Iu., Orlova E.V. Otsenka effektivnosti ispol'zovaniia rastenii Raigrasa (*Lolium Perenne* L.) i Liutserny (*Medicago Sativa* L.) dlia fitoremediatsii neftezagriaznennogo grunta [Evaluation of efficiency of plants of Ryegrass (*Lolium Perenne* L.), and Alfalfa (*Medicago Sativa* L.) for phytoremediation of contaminated soil]. *Uchenye zapiski Orlovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye, tekhnicheskie i meditsinskie nauki*, 2012, no. 3, pp. 327–330.

10. Ivanova N.A., Sharf N.A. Osobennosti pogloshcheniia i migratsii tiazhelykh metallov v organakh rastenii v usloviakh srednego priob'ia [Peculiarities of absorption and migration of heavy metals in the organs of plants in the conditions of the middle Ob]. *Vestnik YUNE*, 2011, no. 2, pp. 3–5.

**I.S. Shchukin, M.A. Avdeeva,
A.A. Galkina, Ja.S. Luferrchik**

PLANTS SELECTION FOR STORMWATER PHYTOFILTERS

Plants are one of the key elements for stormwater phytofilters. Plants serve to restore the hydraulic conductivity of stormwater phytofilters and to absorb contaminants contained in stormwater. The article describes the mechanisms of absorption by plants contaminants contained in stormwater: petroleum products, heavy metals, nitrogen and phosphorus compounds, mechanisms of water absorption and transpiration. On the basis of literature analysis identified the main species that meet the requirements for stormwater phytofilters: woody plants of willow goat willow (*Sálix cáprea*) and white willow

(*Salix álba*); herbaceous plant of the genus Carex (*Sarex*) and plants traditionally used for the device lawns Red Fescue (*Festuca rubra*) and meadow (*Festuca pratensis*), Poa pratensis (*Poa praténsis*), White clover (*Trifolium repens*) and meadow (*Trifolium praténse*).

Keywords: stormwater, phytofilter, heavy metals, petroleum products.

Сведения об авторах

Щукин Игорь Сергеевич (Пермь, Россия) – аспирант, ассистент кафедры «Теплоснабжение, вентиляция и водоснабжение, водоотведение» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (e-mail: shchukin-is@yandex.ru)

Авдеева Марина Андреевна (Пермь, Россия) – студент кафедры «Теплоснабжение, вентиляция и водоснабжение, водоотведение» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (e-mail: smile-tv@rambler.ru)

Галкина Анастасия Андреевна (Пермь, Россия) – студент кафедры «Теплоснабжение, вентиляция и водоснабжение, водоотведение» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (e-mail: Angelove-1994@rambler.ru)

Луферчик Ядвига Сергеевна (Пермь, Россия) – студент кафедры «Теплоснабжение, вентиляция и водоснабжение, водоотведение» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (e-mail: Jadviga1994@mail.ru)

About the authors

Shchukin Igor Sergeevich (Perm, Russia) – Postgraduate student, Assistant Lecturer, Department of Heating, ventilation and water supply, sewerage, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: shchukin-is@yandex.ru).

Avdeeva Marina Andreevna (Perm, Russia) – student, Department of Heating, ventilation and water supply, sewerage, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: smile-tv@rambler.ru).

Galkina Anastasija Andreevna (Perm, Russia) – student, Department of Heating, ventilation and water supply, sewerage, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: Angelove-1994@rambler.ru).

Luferschik Jadviga Sergeevna (Perm, Russia) – student, Department of Heating, ventilation and water supply, sewerage, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: Jadviga1994@mail.ru).

Получено 26.12.2013