



УДК 628.31

**М. Н. БРЮХОВ**, ассистент кафедры водопользования и экологии<sup>1</sup>, аспирант  
кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем<sup>2</sup>

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ БИОАККУМУЛЯЦИИ ПРИ ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4.

эл. почта: mbryukhov@lan.spbgasu.ru

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)", Южно-Уральский государственный университет.

Россия, 454080, Челябинская область, г. Челябинск, просп. В.И. Ленина, д. 76.

тел.: 8 (812) 316-35-10, эл. почта: mich74@mail.ru

*Ключевые слова:* сточные воды, биоаккумуляция, макрофиты, тяжелые металлы, биоинженерные сооружения.

---

*В статье представлены результаты исследований по определению биоаккумуляционной способности выбранных макрофитов по отношению к тяжелым металлам и нефтепродуктам. Полученные данные показали, что каулиния малая, спирогира, роголистник, ряска способны эффективно извлекать поллютанты из сточных вод и повышать рН водной среды.*

---

### Введение

Особенности очистки сточных вод макрофитами заключаются в том, что в технологии используются природные механизмы самоочищения. Макрофиты способны очищать стоки от широкого спектра поллютантов – взвешенных веществ, органических токсикантов, азота, фосфора, серы, тяжелых металлов и бактериального загрязнения [1].

В институте Макса Планка в Плёне (в начале 1950-х годов) впервые были проведены исследования по очистке сточных вод с использованием макрофитов, идеологом которых была Кете Зайдель [2].

При использовании макрофитов в очистке сточных вод необходимо иметь представление о некоторых природных механизмах:

– фитоволатилизация – растения поглощают загрязняющие вещества из почвы или воды, метаболизируют их, а затем выделяют в атмосферу в виде летучей и менее токсичной формы;

– ризофилтрация (фитофилтрация) – сточные воды фильтруются на поверхности корней растений, погруженных в обрабатываемую воду. Для этого используются растения с обширной корневой системой, которые быстро растут и вырабатывают большое количество биомассы. Ризофилтрация используется для удаления тяжелых металлов, особенно свинца, и радиоактивных элементов;

– аккумуляция тяжелых металлов – в водоемах с промышленными стоками макрофиты аккумулируют тяжелые металлы и макроэлементы, тем самым снижая концентрацию поллютантов [3].

Механизм поглощения поллютантов макрофитами основан на их физиологических и морфологических особенностях. Высокими сорбционными свойствами обладают стебли и листья растений, которые задерживают и



поглощают токсиканты из воды. Неукореняющиеся растения накапливают большие количества поллютантов, чем укореняющиеся за счет их миграции на большие площади водной экосистемы [4].

Разные виды макрофитов способны различным образом элиминировать и метаболизировать внесенные поллютанты, что, в свою очередь, зависит от вида растения, особенностей его строения, физических и химических свойств поллютантов, от сроков их разложения, растворимости в воде и других факторов [5].

Преимущество очистки сточных вод макрофитами заключается в отсутствии значительных затрат на строительство и эксплуатацию сооружений, так как удаление загрязняющих веществ происходит без применения сложных технологий [6].

Использование макрофитов для очистки сточных вод распространено в разных странах, таких, как США, страны Евросоюза, Китай, Вьетнам. В России также активно проводятся исследования в этом направлении. В настоящее время работает ряд научных школ, исследования и публикации которых направлены на разработку фитотехнологии в области очистки и доочистки сточных вод. Исследования проводятся под руководством таких ученых, как, например, С. С. Тимофеева (ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»), М. А. Пашкевич (ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»), Д. В. Ульрих (ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет») и других [7-11].

#### **Материалы и методы**

Для проведения исследований были выбраны макрофиты: каулиния малая, спирогира, роголистник и ряска. Выбранные макрофиты помещали в емкости с сильноокислой сточной водой промышленного предприятия, имеющей водородный показатель 2,84. Исследования проводили в течение 8 суток при температуре окружающей среды 20°C. Пробы воды для определения концентрации тяжелых металлов и водородного показателя отбирали из емкостей 1 раз в сутки. Анализ состава сточной воды и фильтрата производили на оборудовании, указанному в [12].

Содержание поллютантов в усредненной сильноокислой пробе сточной воды промышленного предприятия (мг/л): алюминий – 6,85; кобальт – 0,07; хром – 0,18; медь – 4,24; железо – 2,83; марганец – 1,33; никель – 0,93; фосфор – 0,26; цинк – 1,31; нефтепродукты – 4,76.

#### **Результаты исследований**

Результаты проведенных исследований позволили оценить степень биоаккумуляции макрофитов в сильноокислой среде промышленного стока и выявить наиболее устойчивые из них.

Согласно полученным экспериментальным данным, выявлено, что все исследуемые макрофиты сохранили жизнеспособность в сильноокислой среде, продолжали свое развитие и способствовали снижению концентрации поллютантов (рис. 1–3).

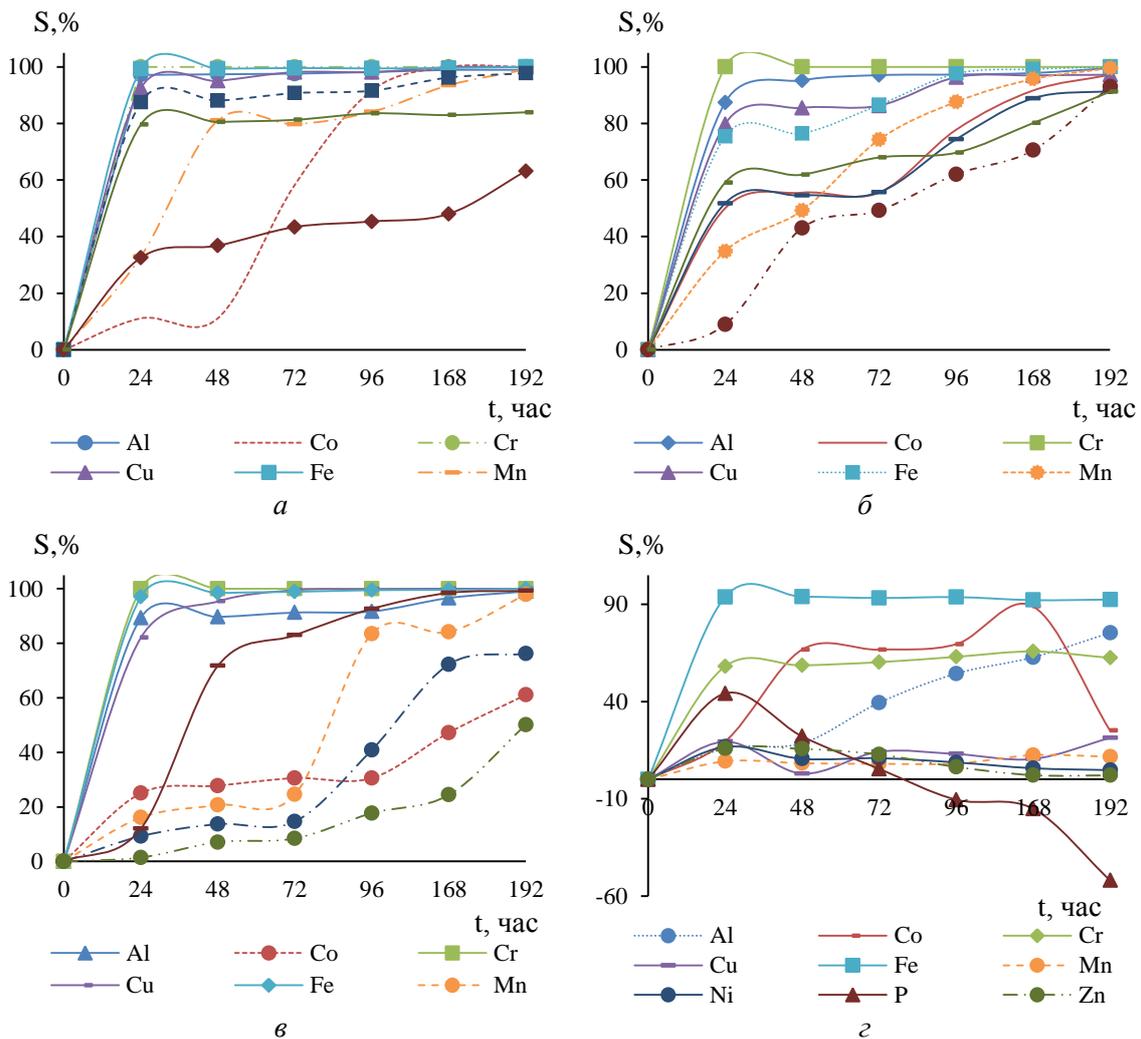


Рис. 1. Эффективность извлечения поллютантов из сточных вод макрофитами в зависимости от времени контакта: *a* – каулиния малая; *б* – спирогира; *в* – роголистник; *з* – ряска

Представленные на рис. 1 зависимости степени извлечения тяжелых металлов из сточной воды от времени контакта с растениями показывают достаточно высокую эффективность извлечения загрязнителей каулинией малой, спирогирой и роголистником. Установлено, что каулиния малая за 24 часа полностью извлекает хром, 97,2% алюминия, 92,5% меди, 99,3% железа, 87,5% никеля, 79,6% цинка. Спирогира с начала экспозиции до ее завершения имеет следующие показатели извлечения тяжелых металлов: хром извлекается на 100 % в первые 24 часа экспозиции; алюминий – от 87,4 до 99,6%; кобальт – от 50 до 97,2%; медь – от 79,8 до 97,2%; железо – от 75,4 до 100%; никель – от 52,8 до 91,5%; цинк – от 59,1 до 91,2%.

В первые 24 часа у каулинии и спирогиры наблюдается относительно низкая эффективность извлечения марганца и фосфора: у спирогиры эффективность извлечения марганца 34,8%, у каулинии – 32,9%; фосфора – 9,91 и 32,6% соответственно. При увеличении времени экспозиции наблюдалось увеличение эффективности биоаккумуляции марганца – до 99,1% у каулинии; у



спирогиры – до 99,5%. Степень биоаккумуляции фосфора выросла у каулинии до 63,2% и до 93,0% у спирогиры.

Роголистник имеет достаточно высокие показатели степени биоаккумуляции за 24 часа по алюминию (89,3%), хрому (100%), меди (82,0%), железу (97,0%). При экспозиции в 192 часа наблюдается увеличение эффективности извлечения от 50 до 100 % по всем поллютантам.

Исследования по извлечению поллютантов ряской указывают на низкую эффективность очистки стоков. В первые 24 часа наблюдается извлечение марганца всего лишь на 9,26%. Максимальное значение степени биоаккумуляции железа ряской достигает 93,7%.

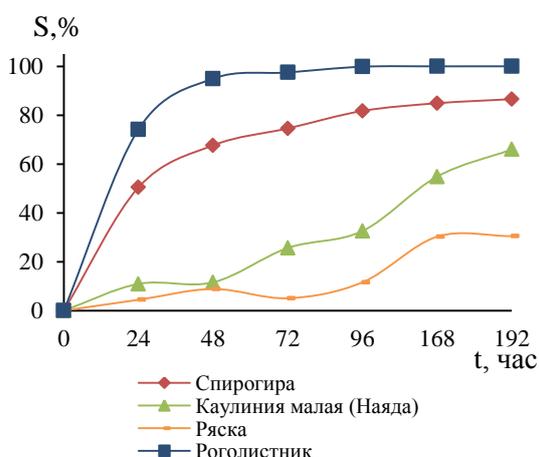


Рис. 2. Эффективность извлечения нефтепродуктов из сточных вод макрофитами в зависимости от времени контакта

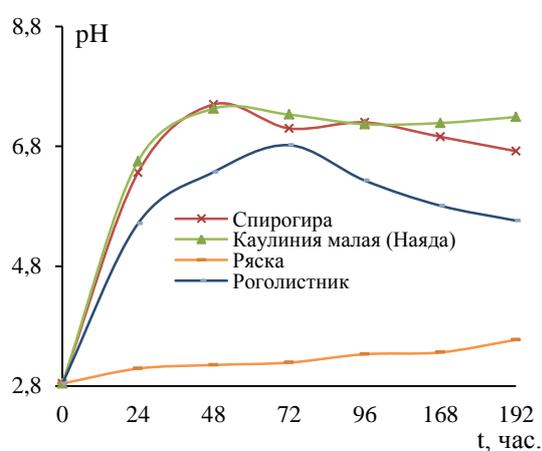


Рис. 3. Изменение pH в зависимости от времени контакта макрофитов с сорбатом

Экспериментальные данные по извлечению нефтепродуктов макрофитами (рис. 2), указывают на то, что спирогира способна извлекать от 50 до 86% нефтепродуктов, каулиния – от 11 до 66%, ряска – от 4 до 30% и роголистник – от 74 до 100%.

Исследования pH сточной воды (рис. 3) указывает на то, что при использовании каулинии и спирогиры pH стока в первые 24 часа повышается от 2,84 до 6,55 и 6,36 соответственно, то есть происходит нейтрализация сильнокислой сточной воды без применения реагентов. При использовании роголистника сточная вода также нейтрализуется, в первые 24 часа pH повышается от 2,84 до 5,51, с последующим увеличением до 6,82 при экспозиции 72 часа. При использовании ряски pH сточной воды в первые 24 часа повышается от 2,84 до 3,09, с последующим увеличением до 3,57 при экспозиции 192 часа. Использование ряски не приводит к нейтрализации сточной воды.

Морфологическая адаптация исследуемых растений к сильнокислой водной среде проходила относительно спокойно. До 72 часов экспозиции все растения имели характерный зеленый окрас. При экспозиции от 96 до 192 часов спирогира, каулиния малая и роголистник приобрели темно-зеленый окрас. Исключением



являлась ряска, у которой при экспозиции 96-192 часа наблюдались признаки угнетения с последующей гибелью растения.

### Выводы

1. Установлено, что исследованные макрофиты спирогира, каулиния малая и роголистник, благодаря своим физиологическим и морфологическим особенностям могут эффективно использоваться в технологиях очистки сильноокислых сточных вод промышленных предприятий от тяжелых металлов и нефтепродуктов.

2. Степень биоаккумуляции тяжелых металлов за короткий промежуток времени достигает высоких значений – от 60 до 100% в зависимости от вида поллютантов. При этом катионы хрома полностью извлекаются макрофитами за 24 часа.

3. Одновременно с тяжелыми металлами из сточной воды удаляются нефтепродукты. Спирогира способна извлекать от 50 до 86% нефтепродуктов, каулиния – от 11 до 66%, ряска – от 4 до 30% и роголистник – от 74 до 100%.

4. Важной особенностью исследованных растений является способность к нейтрализации кислых сточных вод. При использовании каулинии и спирогиры рН стока за 24 часа повышается от 2,84 до 6,55 и 6,36; при использовании роголистника – от 2,84 до 5,51, с последующим увеличением до 6,82.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыбка, К. Ю. Механизмы очистки сточных вод от биогенных элементов (азота и фосфора) в фито-очистных системах / К. Ю. Рыбка, Н. М. Щеголькова. – Текст : непосредственный // Экосистемы. Экология и динамика. – 2018. – Том 2. – № 4. – С. 144–171.

2. Построенные водно-болотные угодья для очистки сточных вод. – URL: <https://infourok.ru/postroennye-vodno-bolotnye-ugodya-dlya-ochistki-stochnyh-vod-5592610.html>. – Текст : электронный.

3. Петракова, Е. А. Макрофиты в фиторемедиации и биоиндикации вод : специальность 03.02.08 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Петракова Елена Александровна ; Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. – Брянск, 2017. – 23 с. – Текст : непосредственный.

4. Соловых, Г. Н. Роль макрофитов р. Урал в процессах самоочищения водотока от полихлорированных бифенилов / Г. Н. Соловых, Н. В. Винокурова, Л. В. Голинская. – Текст : непосредственный // Вестник Оренбургского государственного университета. – № 10 (185) – 2015. – С. 118–121.

5. Морозов, Н. В. Элиминирование и детоксикация хлори фосфорорганических ядохимикатов макрофитами / Н. В. Морозов. – Текст : непосредственный // Филология и культура. – 2006. – № 7. – С. 126–133.

6. Кирилина, Т. В. Доочистка сточных вод от соединений азота и фосфора погруженными макрофитами / Т. В. Кирилина, А. С. Сироткин, До Тхи Тху Ханг ; Казанский государственный технологический университет. – Текст : непосредственный // Вода. Химия и экология. – 2011. – № 7. – С. 33–38.

7. Тимофеева, С. С. Фитофилтры для очистки сточных вод / С. С. Тимофеева, Д. В. Ульрих, С. С. Тимофеев. – Текст : электронный // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – № 16. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fitofiltry-dlya-ochistki-stochnyh-vod>.

8. Пашкевич, М. А. Оценка эффективности процесса фитоэкстракции при очистке карьерных сточных вод / М. А. Пашкевич, А. Э. Коротаева. – Текст : электронный //



Горный информационно-аналитический бюллетень : научно-технический журнал. – 2022. – № 6–1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-protsessafitoeekstraksii-pri-ochistke-kariernyh-stochnyh-vod>.

9. Солнышкова, М. А. Биоиндикация как способ оценки эффективности очистки карьерных сточных вод с использованием биоплато / М. А. Солнышкова, М. А. Журавкова, М. А. Пашкевич. – Текст : непосредственный // Инновационные подходы в современной науке : X Международная научно-практическая конференция : сборник статей / Санкт-Петербургский горный университет. – Москва : Интернаука. – 2017. – Том 10 (10). – С. 82–85.

10. Тимофеева, С. С. Роль водорослей и высших водных растений в обезвреживании цианидсодержащих сточных вод / С. С. Тимофеева, В. З. Краева, О. А. Меньшикова. – Текст : непосредственный // Водные ресурсы. – 1985. – № 6. – С. 111–116.

11. Тимофеева, С. С. Использование макрофитов для интенсификации биологической очистки роданидсодержащих сточных вод / С. С. Тимофеева, О. А. Меньшикова. – Текст : непосредственный // Водные ресурсы. – 1985. – № 6. – С. 80–85.

12. Роль природных сорбентов и отходов трубного производства в очистке кислых металлсодержащих сточных вод / М. Н. Брюхов, Д. В. Ульрих, Т. М. Лонзингер, С. Е. Денисов. – Текст : электронный // Градостроительство и архитектура. – 2023. – Том 13, № 4. – С. 11–19. – DOI: 10.17673/Vestnik.2023.04.02.

**BRYUKHOV Mikhail Nikolaevich, assistant of the chair of water management and environment<sup>1</sup>, postgraduate student of the chair of urban planning, engineering networks and systems<sup>2</sup>**

## BIOACCUMULATION EFFICIENCY IN WASTEWATER TREATMENT

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering  
4, 2nd Krasnoarmeiskaya St., Saint Petersburg, 190005, Russia.  
e-mail: mbryukhov@lan.spbgasu.ru

<sup>2</sup> South Ural State University  
76, Lenin Prospekt, Chelyabinsk, Chelyabinsk Region, Ural Federal District, 454080, Russia.  
Tel.: 8 (812) 316-35-10; e-mail: mich74@mail.ru

*Key words:* wastewater, bioaccumulation, macrophytes, heavy metals, bioengineering facilities.

---

*The article presents the results of studies to determine the bioaccumulative ability of selected macrophytes in relation to heavy metals and petroleum products. The data obtained showed that small kaulinia, spirogyra, hornwort, duckweed are able to effectively extract pollutants from wastewater and increase the pH of the aquatic environment.*

---

## REFERENCES

1. Rybka K. Yu., Shchegolkova N. M. Mekhanizmy ochistki stochnykh vod ot biogennykh elementov (azota i fosfora) v fito-ochistnykh sistemakh [Mechanisms of wastewater treatment of nutrients (nitrogen and phosphorus) in phyto-treatment systems]. *Ekosistemy: Ekologiya i dinamika* [Ecosystems. Ecology and dynamics]. 2018, Vol. 2. № 4, P. 144-171.

2. Postroennye vodno-bolotnye ugodya dlya otshistki stochnykh vod [Wetlands constructed for wastewater treatment]. – URL: <https://infourok.ru/postroennye-vodno-bolotnye-ugodya-dlya-ochistki-stochnyh-vod-5592610.html>.

3. Petrakova E. A. Makrofity v fitoremediacii i bioindikacii vod [Macrophytes in phytoremediation and bioindication of waters]: spetsialnost 03.02.08: avtoreferat dis. ...



kandidata biologicheskikh nauk. Vladimirskiy gos. un-t im. Aleksandra Grigorevicha i Nikolaya Grigorevicha Stoletovyykh. Bryansk, 2017, 23 p.

4. Solovykh G.N., Vinokurova N.V., Golinskaya L.V. Rol makrofitov r. Ural v processakh samoochishcheniya vodotoka ot polikhlorirovannykh bifenilov [Role of macrophytes of the Ural River in the processes of watercourse self-purification from polychlorinated biphenyls]. Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Vestnik of the Orenburg State University]. Orenburg, 2015, № 10 (185), P. 118-121.

5. Morozov N. V. Eliminirovanie i detoksikaciya hlori fosfororganicheskikh yadohimikatov makrofitami [Elimination and detoxification of organophosphorus toxic chemicals by macrophytes]. Filologiya i kultura [Philology and culture]. № 7, 2006, P. 126-133.

6. Kirilina T. V., Sirotkin A. S., Tkhu Do. Doochistka stochnykh vod ot soedineniy azota i fosfora pogruzhennymi makrofitami [Wastewater pretreatment from nitrogen and phosphorus compounds by submerged macrophytes]. Voda: Himiya i ekologiya [Water: chemistry and ecology]. №7, 2011, P. 33-38.

7. Timofeeva S. S., Ulrikh D. V., Timofeev S. S. Fitofiltry dlya ochistki stochnykh vod [Phytofilters for wastewater treatment]. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Herald of Technological University]. 2016, №16. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fitofiltry-dlya-ochistki-stochnykh-vod>.

8. Pashkevich M. A., Korotaeva A. E. Otsenka effektivnosti processa fitoekstrakcii pri ochistke karernykh stochnykh vod [Evaluation of the efficiency of the phytoextraction process in the treatment of quarry wastewater] Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten : nauchno-tekhnicheskii zhurnal [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2022, № 6-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-protssesa-fitoekstraktsii-pri-ochistke-kariernykh-stochnykh-vod>.

9. Solnyshkova M. A., Zhuravkova M.A., Pashkevich M.A. Bioindikaciya kak sposob otsenki effektivnosti ochistki karernykh stochnykh vod s ispolzovaniem bioplato [Bioindication as a way to assess the efficiency of quarry wastewater treatment using bioplato]. Innovacionnye podkhody v sovremennoy nauke [Innovative approaches in modern science]: sb. st. po materialam X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. № 10(10). Moscow, Izd. Internauka, 2017, P. 82-85.

10. Timofeeva S. S., Kraeva V. Z., Menshikova O. A. Rol vodorosley i vysshikh vodnykh rasteniy v obezvrezhivanii tsianidsoderzhashchikh stochnykh vod [Role of algae and higher aquatic plants in the neutralisation of cyanide-containing wastewater]. Vodnye resursy [Water resources]. 1985, № 6, P. 111–116.

11. Timofeeva S. S., Menshikova O. A. Ispolzovanie makrofitov dlya intensivatsii biologicheskoy ochistki rodanidsoderzhashchikh stochnykh vod [Use of macrophytes for intensification of biological treatment of rhodanide-containing wastewaters] Vodnye resursy [Water resources]. 1985, № 6, P. 80–85.

12. Bryuhov M. N., Ulrikh D. V., Lonzinger T. M., Denisov S.E. Rol prirodnykh sorbentov i otkhodov trubnogo proizvodstva v otshistke kislykh metallsoederzhashchikh stochnykh vod [Role of natural sorbents and pipe wastes in the treatment of acidic metal-containing wastewaters]. Gradostroitelstvo i arhitektura [Urban planning and architecture]. 2023, Vol. 13, № 4, P. 11–19. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.04.02.

© М. Н. Брюхов, 2025

Получено: 16.01.2025 г.