

В.К. Тохтарь, М.Ю. Третьяков, Л.А. Тохтарь,
С.М. Шевченко, Д.В. Великих

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИБРЕЖНО-ВОДНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ФИТООЧИСТНОЙ СИСТЕМЫ ШАХТНЫХ СТОЧНЫХ ВОД НА ГОРНОРУДНОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», НОЦ «Ботанический сад НИУ «БелГУ»

В статье рассматриваются этапы работ по формированию фитоочистной системы шахтных сточных вод на горнорудном предприятии: от подбора видов до периода их использования в процессе фитоочистки. Фитоочистная система была создана в виде системы искусственно плавающих островов на пруде-отстойнике и опытно-промышленной фитоочистной системы в виде лагун. Приведены результаты исследований фиторемедиационной способности прибрежно-водных растений в отношении сточных вод горнорудного предприятия. Для массового получения посадочного материала прибрежно-водных видов были специально разработаны способы их размножения из семян и методами клonalного микроразмножения.

Ключевые слова: фиторемедиация, шахтные сточные воды, *Phragmites australis*, *Typha angustifolia*, *Typha latifolia*, *Typha laxmannii*, искусственные плавающие острова

Цитирование: Тохтарь В.К., Третьяков М.Ю., Тохтарь Л.А., Шевченко С.М., Великих Д.В. Опыт использования прибрежно-водных растений для создания фитоочистной системы шахтных сточных вод на горнорудном предприятии // Промышленная ботаника. 2025. Вып. 25, № 4. С. 133–140. DOI: 10.5281/zenodo.17801162

Введение

Очистка сточных вод является одной из ключевых задач в решении экологических проблем активно функционирующих предприятий горнорудной промышленности. Реализация мероприятий, проводимых в этом направлении, обеспечивает биобезопасность производства [3, 4, 8, 11]. Использование физико-химических методов очистки при большом объеме загрязненных вод приводит к высоким экономическим затратам [7, 10]. Основными загрязняющими веществами сточных вод горнодобывающих и горноперерабатывающих предприятий являются взвешенные вещества, тяжелые металлы и соединения азота. Последние образуются в результате буровзрывных работ при проходке горных выработок с использованием взрывча-

тых веществ на основе нитрата аммония, нитрометана и нитрита натрия. Кроме того, сточные шахтные воды или карьерные воды могут характеризоваться повышенной кислотностью или щелочностью [2]. Одним из перспективных альтернативных методов является использование растений для очистки шахтных сточных вод. В последнее время такие подходы начинают использоваться предприятиями на территории Российской Федерации, поскольку они относятся к экологически чистым методам и позволяют значительно экономить финансовые средства в реализации задач охраны окружающей среды [1, 5, 6, 9, 12, 15, 16]. За рубежом фиторемедиационные технологии используются достаточно давно и крайне успешно [17–21],

27]. Одним из важных вопросов, которые необходимо изначально решить для внедрения этих подходов в работу отечественных предприятий, является эффективный подбор видов для создаваемых фитоочистных систем (далее – ФОС) в конкретных природно-климатических условиях [13, 14, 22–26].

Цель и задачи исследований

Целью исследования было создание опытной полупромышленной фитоочистной установки на основе подбора эффективных растений-аккумуляторов токсичных веществ для очистки сточных шахтных вод горнорудного предприятия.

Для достижения этой цели на разных этапах исследования решались следующие задачи:

- 1) провести поиск перспективных для применения в ФОС местных прибрежно-водных растений;
- 2) выполнить оценку накопительной способности и устойчивости растений к токсичным веществам шахтных сточных вод горнорудного предприятия;
- 3) создать варианты ФОС в виде искусственно плавающих островов на пруде-отстойнике и полупромышленной установки в виде лагун.

Объекты и методики исследований

Объектами исследования были прибрежно-водные и водные растения, потенциально обладающие способностью к эффективному накоплению в своих тканях поллютантов сточных вод: тростник обыкновенный или южный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), рогоз Лаксмана (*Typha laxmannii* Lepech.), рогоз узколистный (*Typha angustifolia* L.), рогоз широколистный (*Typha latifolia* L.), ряска малая (*Lemna minor* L.), водокрас лягушачий (*Hydrocharis morsus-ranae* L.), рдест пронзенолистный (*Potamogeton perfoliatus* L.), элодея канадская (*Elodea canadensis* Michx.).

Модельные опыты по выявлению потенциала накопления токсикантов различными видами растений проводились на базе УНУ НОЦ «Ботанический сад НИУ «БелГУ» в специальных ваннах, наполненных сточными шахтными во-

дами. В них в ходе экспериментов погружались опытные партии растений для проведения экспериментов.

Анализ содержания поллютантов в растительных тканях модельных видов осуществлялся на базе испытательной лаборатории по агрохимическому обслуживанию сельскохозяйственного производства ФГБУ «Центр агрохимической службы «Белгородский» (регистрационный номер РОСС RU.0001.514760). Анализ растений проводили каждые две недели.

Созданная в ходе исследования полупромышленная ФОС состояла из 16 блоков, заполненных сорбентом различных фракций и черноземом, в которые высаживались растения. Направление поступления сточных вод и видовой состав растений в них отличался. Каждый из модулей был представлен двумя параллельно расположеными ячейками с горизонтальным и вертикальным током воды. В модули помещались сорбирующие компоненты, грунт и разные комбинации растений-фиторемедиантов:

В ячейках с вертикальным (1 и 5) и горизонтальным током воды (9 и 13) располагались в 4 параллельных рядах по 4 растения: *Typha latifolia*, *Phragmites australis*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis*.

В модуле в ячейках с вертикальным (2 и 6) и горизонтальным током воды (10 и 14) располагались в 4 параллельных рядах по 4 растения: *Typha angustifolia*, *Phragmites australis*, *Typha angustifolia*, *Phragmites australis*.

В модуле в ячейках с вертикальным (3 и 7) и горизонтальным током воды (11–15) располагались в 4 параллельных рядах по 4 растения: *Typha laxmannii*, *Phragmites australis*, *Typha laxmannii*, *Phragmites australis*.

В модуле в каждой из ячеек с вертикальным (4 и 8) и горизонтальным током воды (12–16) растения отсутствовали.

Внедрение фиторемедиационной технологии очистки шахтных сточных вод проводилось путем использования двух независимых, дополняющих друг друга ФОС: искусственные плавающие острова (далее – ИПО) с прибрежно-водными растениями и опытно-промышленная ФОС, созданная в виде лагун.

Результаты исследований и их обсуждение

Первым этапом на пути к созданию ФОС на территории региона было проведение флористических обследований для сбора, поиска и оценки растений в отношении их фиторемедиационного потенциала. В 2019 г. совместно с сотрудником Института внутренних вод РАН (Ярославская область, г. Борок) к.б.н. А.Г. Лапировым были выявлены перспективные виды местных водных и прибрежно-водных растений для проведения оценки степени их устойчивости к действию шахтных сточных вод горнорудного предприятия:

1. Воздушно-водные растения (гелофиты): тростник обыкновенный или южный (*Phragmites australis*), рогоз Лаксмана (*Typha laxmannii*), рогоз узколистный (*Typha angustifolia*), рогоз широколистный (*Typha latifolia*).

2. Настоящие водные растения (гидрофиты):

а) плавающие на поверхности воды: ряска малая (*Lemna minor*) и водокрас лягушачий (*Hydrocharis morsus-ranae*);

б) погруженные укореняющиеся: рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus*);

в) гидрофиты, свободно плавающие в толще воды: элодея канадская (*Elodea canadensis*).

Вторым этапом разработки ФОС стала постановка и проведение модельных опытов с целью выявления растений, наиболее устойчивых к действию шахтных сточных вод горнорудного пред-

приятия. Для этого отобранные виды растений культивировались в пластиковых ваннах с шахтной водой в течение вегетационного периода. В таблице 1 приведены минимальные и максимальные значения накопления поллютантов в зеленой вегетативной части модельных растений.

В ходе проведенного модельного эксперимента было установлено, что наименее устойчивым к действию сточных шахтных вод горнорудного предприятия оказался *Potamogeton perfoliatus*. К 52-му дню культивирования вида у ряда экземпляров начали развиваться некротические процессы, постепенно приведшие к полной гибели растений, что связано, по-видимому, с их токсическим отравлением железом. Наименее восприимчивым к накоплению исследуемых поллютантов оказались *Phragmites australis* и *Typha laxmannii*. Из рассматриваемых в модельном эксперименте растений-гидрофитов высокими поглотительными свойствами к накоплению цинка и меди обладали *Hydrocharis morsus-ranae* и *Elodea canadensis*. Остальные исследуемые виды растений накапливали эти элементы незначительно.

В ходе выполнения работ был составлен перечень требований, предъявляемых к растениям-фиторемедиантам, для их внедрения в практику использования в ФОС:

1) устойчивость растений к действию поллютантов;

Таблица 1. Уровень накопления элементов в растениях, произрастающих в ваннах со сточными водами (от минимального к максимальному значению в течение всего периода проведения эксперимента)

Наименование показателей	<i>Phragmites australis</i>	<i>Typha laxmannii</i>	<i>Lemna minor</i>	<i>Hydrocharis morsus-ranae</i>	<i>Potamogeton perfoliatus</i>	<i>Elodea canadensis</i>
Сухое вещество, %	47,4–74,2	14,6–68,3	5,3–12,3	4,2–7,0	8,0–11,1	9,2–21,2
Цинк, млн^{-1} (мг/кг) на сухое вещество	5,1–10,4	7,1–26,1	8,9–33,7	28,8–78,6	19,5–37,6	10,7–34,1
Медь, млн^{-1} (мг/кг) на сухое вещество	0,6–2,0	2,3–6,4	0,6–7,2	2,1–14,2	1,3–11,1	0,4–10,8
Марганец млн^{-1} (мг/кг) на сухое вещество	59,0–102,0	161,0–480,0	2061,0–2939,0	605,0–1589,0	67,0–317,0	101,0–149,0
Железо млн^{-1} (мг/кг) на сухое вещество	118,0–324,0	122,0–266,0	439,0–2695,0	84,0–1903,0	1209,0–5559,0	1396,0–2760,0
Нитраты (мг/кг) на сухое вещество	322,0–842,0	427,0–1408,0	366,0–565,0	499,0–1589,0	367,0–966,0	251,0–648,0

- 2) высокая аккумулирующая способность элементов, ПДК которых выходит за нормативные показатели;
- 3) адаптированность растений к абиотическим и биотическим условиям среды;
- 4) период культивирования, позволяющий использовать растения в течение нескольких вегетационных циклов.

На третьем этапе разработки ФОС была создана конструкция полупромышленного прототипа, которая состояла из 16 модулей. В ходе культивирования растений в течение вегетационного периода в модулях согласно схеме, описанной в методике, было установлено, что тип тока воды с вертикальным и горизонтальным направлением шахтных сточных вод существенно не влиял на морфологическое состояние растений. Наиболее эффективными модулями, используемыми для фитоочистки сточных вод, были модули, в которых размещались пары растений: *Turpha angustifolia* и *Phragmites australis*, а также *Turpha laxmannii* и *Phragmites australis* (табл. 2).

На четвертом этапе внедрения фиторемедиационной технологии очистки сточных шахтных вод на предприятии было необходимо получение больших объемов качественного посадочного материала. В связи с этим на базе НОЦ «Ботанический сад НИУ «БелГУ» были разработаны эффективные методы вегетативного и генеративного размножения растений-фиторемедиантов, в том числе способом клonalного микроразмножения. Это позволило получить необходимое количество посадочного материала для наполнения ими полупромышленной ФОС [13].

В ходе выполнения работ была разработана специальная схема проращивания семян *Turpha laxmannii*, *T. angustifolia* и *T. latifolia*. Для этого почковидные соцветия трех видов рогозов собирали в начале января. В этот период семена на растениях не только вызрели, но и прошли период естественной стратификации, что существенно повышало их всхожесть. Соцветия погружали в воду для того, чтобы нарушить их целостность. Волоски оклоцветника, образующиеся при созревании плодов (пух) полностью смачивались водой и оставались на поверхно-

сти воды, а семена осипались на дно емкости. Верхний слой с плавающим пухом удалялся, а оставшаяся вода фильтровалась через бумажные фильтры. Таким образом были получены очищенные семена, которые можно было использовать для проращивания.

В качестве субстрата для проращивания семян рогозов использовали готовый торфяной субстрат от компании Агро Торф ЛТД, рецептура APS-2, состоящий из верхового торфа с добавлением комплекса минеральных удобрений PGMix. Кислотность используемого субстрата была в пределах от 5,5 до 6,5 pH, влажность – не более 65 %. Содержание подвижных форм питательных веществ (на 100 л) характеризовалось следующими параметрами: азот (нитратный + аммонийный) – не менее 160 мг; фосфор (в пересчете на P_2O_5) – не менее 200 мг; калий (в пересчете на K_2O) – не менее 250 мг.

При проращивании семян *Turpha latifolia* всхожесть при использовании готового субстрата оказалась низкой. В связи с этим на поверхность основного субстрата был нанесен песок, в который высевались семена, что позволило резко увеличить процент всхожести.

Растения *Phragmites australis* крайне плохо размножались с помощью семян, поэтому было проведено введение этого вида в культуру *in vitro*. В качестве первичных эксплантов растений тростника использовали корневищные почки. Корневища отмывали в течение 5 минут под проточной водой. Затем почки отделяли от корневища и поэтапно стерилизовали экспланты 0,5 %-ным раствором перманганата калия ($KMnO_4$) и 1 %-ным раствором фунгицида «Фундазол, СП». После стерилизации корневищные почки тростника переносили в ламинар-бокс, где в стерильных условиях проводили их обработку препаратом «Белизна», разбавленном в соотношении 1 : 1 с дистиллированной водой с добавлением 2-х капель ПАВ Tween 20. Экспланты высаживали в пробирки с питательной средой Мурасиге-Скуга, дополненную 0,5 мг/л 6-бензиламинопурином. Пробирки с высаженными корневищными почками тростника размещали в культураль-

Таблица 2. Концентрация поллютантов в шахтной воде при использовании различных режимов тока воды и составов растений в модулях

Массовая концентрация, мг/дм ³	Исходная	РШ/Т VF	РУ/Т VF	РЛ/Т VF	K VF	РШ/Т HF	РУ/Т HF	РЛ/Т HF	K HF
Цинк	0,07	менее 0,005	0,021	менее 0,005					
Медь	0,003	0,006	0,005	0,002	0,004	0,003	0,004	0,002	0,002
Марганец	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04
Железо	1,21	0,64	0,23	0,35	0,44	0,18	0,19	0,16	0,16
Нитраты	4,8	0,24	1,11	0,24	5,4	0,19	0,49	0,23	2,5

ной комнате, оборудованной световыми стеллажами, и культивировали под люминесцентными лампами. Укоренение тростника *in vitro* проводили с использованием ½ минерального состава питательной среды по прописи Мурасиге-Скуга, с добавлением 1 мг/л индолилуксусной кислоты. Продолжительность этапа укоренения тростника составляла 14 суток. По окончании культивирования в стерильных условиях укорененные растения высаживали в парник в рассадные кассеты, которые характеризовались высокой приживаемостью в условиях открытого грунта.

Выполнение работ по массовому размножению растений рогозов из семенного материала и полученной культуры тростника *in vitro* позволило подготовить и загрузить в ФОС достаточное количество посадочного материала.

В ходе формирования ФОС на пруде-отстойнике горнообогатительного комбината были проведены работы по созданию системы ИПО с прибрежно-водными растениями. В период с 2022 по 2024 гг. была сформирована система фитоочистки шахтных сточных вод, включающая 2400 ИПО с высаженными в них 31200 экземплярами растений: *Typha laxmannii* – 7800 шт.; *T. angustifolia* – 7800 шт.; *T. latifolia* – 7800 шт.; *Phragmites australis* – 7800 шт. В лагунах полупромышленной установки также были высажены 4 вида растений: *Phragmites australis* – 2673 шт.; *Typha latifolia* – 2673 шт.; *T. angustifolia* – 2673 шт.; *T. laxmannii* – 2673 шт. [26].

Начиная с 2024 г. и по настоящее время на территории предприятия проводится регуляр-

ный мониторинг состояния растений-фиторемедиантов. Для выполнения мониторинговых исследований на территории УНУ НОЦ «Ботанический сад НИУ «БелГУ» заложены контрольные мониторинговые площадки с теми же, что и в ФОС растениями. Согласно разработанной методике, в течение вегетационного сезона осуществляется измерение морфологических параметров растений, анализируется содержание поллютантов на входе и выходе из лагун ФОС. Кроме этого, проводится исследование особенностей накопления токсикантов в надземной и подземной части растений.

Выводы

1. Создание ФОС для шахтных сточных вод горнорудного предприятия требует проведения следующих мероприятий: поиск местных видов растений, способных произрастать в водной среде; подбор видов и экотипов, толерантных к конкретному комплексу токсикантов и обладающих аккумуляционной способностью из сточных вод; разработка способов массового размножения устойчивых экотипов растений; производство достаточного количества посадочного материала; разработка конструкции и конфигурации ФОС.

2. Полученные результаты оценки аккумулирующей способности прибрежно-водных растений свидетельствуют о перспективности применения в фиторемедиационных системах для очистки сточных вод горно-обогатительных комбинатов *Typha laxmannii*, *T. angustifolia*, *T. latifolia* и *Phragmites australis*.

3. Для более полного охвата спектра аккумуляции поллютантов, присутствующих в сточных водах, необходимо расширять список растений фиторемедиантов. Перспективным решением задач по аккумуляции определенных элементов может также стать использование устойчивых микроорганизмов-симбионтов ризосфера.

4. Использование растений в фиторемедиационных системах в виде лагун может быть более эффективно при укосе зеленой массы в конце вегетационного периода. Эта масса может стать ценным сырьем для получения зеленых удобрений или создания биофильтров.

5. Нерешенной задачей, требующей дальнейших исследований, является установление сроков эффективного использования растений в ФОС без снижения фитоэкстрактивной способности видов.

Исследование выполнено при поддержке: гранта Министерства науки и высшего образования РФ № FZWG-2023-0007 «Адаптивные реакции микроорганизмов: теоретические и прикладные аспекты».

1. Богуславская Н.В. Закономерности биохимической очистки воды с использованием высших водных растений [использование дренажных вод] // Экологическая безопасность в АПК. Реферативный журнал. 2007. N 3. С. 622.
2. Вараева Е.А., Аксенов В.И. Технология очистки сточных вод горно-обогатительных комбинатов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. N 1. С. 98–106.
3. Высоцкий С.П., Гулько С.Е. Снижение вредного воздействия горных предприятий на окружающую среду // Научный вестник НИИГД Респиратор. 2017. N 1(54). С. 65–74.
4. Жолдакова З.И., Синицына О.О., Турбинский В.В. О корректировке требований к зонам санитарной охраны источников централизованного хозяйствственно-питьевого водоснабжения населения // Гигиена и санитария. 2021. Т. 100, N 11. С. 1192–1197.

5. Исаков В.Г., Абрамова А.А., Непогодин А.М. Зеленые технологии в очистке поверхностных и сточных вод объектов ЖКХ // Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования. Материалы VIII Международной конференции (Ижевск, 23–24 апреля 2019 г.). Т. 1. Ижевск: Изд-во ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2019. С. 460–465.
6. Калайда М.Л., Борисова С.Д. Доочистка производственных сточных вод с помощью высших водных растений // Экология и промышленность России. 2010. N 3. С. 33–35.
7. Мирошина Т.А., Яковченко М.А. Методы очистки сточных шахтных вод от сульфатов (обзор) // Экологическая химия. 2022. Т. 31, N 6. С. 301–307.
8. Велюжинец Г.А., Крупнов Л.В., Бородина Т.Ю., Паршинцев Е.А., Больщакова О.В. Очистка промышленных и шахтных сточных вод – один из ключевых аспектов экологической политики ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» // Научный вестник Арктики. 2020. N 8. С. 36–44.
9. Попов А.Н. К вопросу о защите поверхностных питьевых водоисточников от загрязнений, поступающих с рассеянным стоком. Сообщение 4 «Функционирование биоинженерного сооружения на основе растительного сообщества, организованного для защиты водных объектов от соединений металлов» // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2016. N 2(98). С. 26–37.
10. Потапов В.А., Макаров К.С. Экономическая оценка обеззараживания воды методом электрического разряда // Энергетика в современном мире. Сборник статей VII Международная заочная научно-практической конференции (Чита, 01–04 декабря 2015 г.). Чита, 2015. С. 16–20.
11. Сапожникова В.А. О необходимости совершенствования законодательства в целях стимулирования формирования и развития в России сектора экологических услуг по водоснабжению и очистке сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. N 5. С. 36а–42.

12. Субботина Ю.М. Альтернативный опыт использования высшей водной растительности для доочистки сточных вод // Наука и мир. 2014. N 3-1(7). С. 99–104.
13. Тохтарь В.К., Третьяков М.Ю., Зеленкова В.Н., Тохтарь Л.А., Никулин И.С., Воропаев В.С., Фомина Е.В., Федюк Р.С. Особенности накопления некоторых элементов почвенного питания растениями-фиторемедиантами техногенно загрязненных сточных вод горнорудных предприятий // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28, N 7. С. 54–59.
14. Тохтарь В.К., Шевченко С.М., Третьяков М.Ю. Инокуляция *Lolium perenne* L. для повышения фиторемедиационного потенциала растений при очистке шахтных сточных вод горнорудных предприятий // Новости науки 2025: гуманитарные и точные науки. Сборник материалов LVIII Международной очно-заочной научно-практической конференции (Москва, 19 декабря 2024). М.: Издво НИЦ «Империя», 2024. Т. 2. С. 215–218.
15. Ханбабаева О.Е., Сорокупдов В.Н., Сорокупдова О.А. Использование многолетних декоративных растений для озеленения и очищения водоемов // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. N 9. С. 26–35.
16. Челноков В.В., Раткин И.М., Заболотная Е. Современные технологии биологической очистки воды // Успехи в химии и химической технологии. 2020. Т. 34, N 6(229). С. 9–11.
17. Gupta M., Sharma P., Sarin N.B., Sinha A.K. Differential response of arsenic stress in two varieties of *Brassica juncea* L. // Chemosphere. 2009. Vol. 74, Iss. 9. P. 1201–1208.
18. Lei Y., Carlucci L., Rijnaarts H., Langenhoff A. Phytoremediation of micropollutants by *Phragmites australis*, *Typha angustifolia*, and *Juncus effusus* International Journal of Phytoremediation. 2023. Vol. 25, Iss. 1. P. 82–88.
19. Rascio N., Navari-Izzo F. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? // Plant Science. 2011. Vol. 80, Iss. 2. P. 169–181.
20. Reeves R.D., Baker A.J.M., Jaffré T., Erskine P.D., Echevarria G., van der Ent A. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements // New Phytologist. 2018, Vol. 218, Iss. 2. P. 407–411.
21. Saha P., Shinde O., Sarkar S. Phytoremediation of industrial mines wastewater using water hyacinth // International Journal of Phytoremediation. 2017. Vol. 19, Iss. 1. P. 87–96.
22. Tokhtar V.K., Tretyakov M.Yu., Zelenkova V.N., Biryukov D.V. Evaluation of the impact of technogenically polluted wastewater on the morphological and physiological parameters of phytoremediants in combination with various types of microorganisms / E3S Web Conf. 2023. Vol. 411: 02015.
23. Tokhtar V.K., Tretyakov M.Yu., Zelenkova V.N., Nikulin I.S., Voropaev V.S. Features of accumulation of sulfur and phosphorus by phytoremediants from technogenically polluted wastewater of mining enterprises // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 480: 02029.
24. Tokhtar V.K., Tretyakov M.Yu., Zelenkova V.N., Biryukov D.V., Voropaev V.S. Assessment of phytoremediation potential of some cereals under the action of mine wastewater of a mining enterprise // BIO Web Conf. 2025. Vol. 160: 01017.
25. Tokhtar V.K., Tretiakov M.Yu., Zelenkova V.N., Petrunova T.V. Assessment of the phytoremediation potential of aquatic plants of the Belgorod region for wastewater treatment // International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES). 2022. Vol. 12, Iss. 1. P. 207–216.
26. Tretyakov M.Yu., Tokhtar V.K., Tokhtar L.A., Zelenkova V.N., Nikulin I.S., Voropaev V.S. Prospects for the use of the phytoremediant *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. for obtaining green fertilizers // BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 118: 01031.
27. Vidayanti V., Choesin D.N., Iriawati I. Phytoremediation of Chromium: distribution and speciation of chromium in *Typha angustifolia* // International Journal of Plant Biology. 2017. Vol. 8, Iss. 1: 6870.

Поступила в редакцию: 15.10.2025

UDC 502.51:581.5:58.01/.07

EXPERIENCE IN USING COASTAL AQUATIC PLANTS TO CREATE A PHYTO-PURIFICATION SYSTEM FOR MINE WASTEWATER AT A MINING ENTERPRISE

**V.K. Tokhtar, M.Yu. Tretyakov, L.A. Tokhtar, S.M. Shevchenko,
D.V. Velikikh**

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Belgorod State National Research University» REC «Botanical Garden of NRU «BelSU»

The article discusses the stages of work on the formation of a phyto-purification system of mine wastewater at a mining enterprise: from the selection of species to the period of their use in the phyto-purification process. The phyto-purification system was created in the form of a system of artificially floating islands on a settling pond and a pilot phyto-purification system in the form of lagoons. The results of studies of the phytoremediation ability of coastal aquatic plants in relation to wastewater from a mining enterprise are presented. Special attention is paid to the peculiarities of clonal micropropagation of phytoremediant plants.

Key words: phytoremediation, mine wastewater, *Phragmites australis*, *Typha angustifolia*, *Typha latifolia*, *Typha laxmannii*, artificial floating islands

Citation: Toktar V.K., Tretyakov M.Yu., Toktar L.A., Shevchenko S.M., Velikikh D.V. Experience in using coastal aquatic plants to create a phyto-purification system for mine wastewater at a mining enterprise // Industrial botany. 2025. Vol. 25, N 4 P. 133–140. DOI: 10.5281/zenodo.17801162
