

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕЛОКРЫЛЬНИКА БОЛОТНОГО В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА ДЛЯ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ОТ МЕТАЛЛОВ НА ПРИМЕРЕ АО «КАРЕЛЬСКИЙ ОКАТЫШ»

М. А. Чукаева<sup>1</sup>, Д. С. Петров<sup>1</sup>, Н. А. Малыгин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II  
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

<sup>2</sup> ООО «Элком» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 5 марта 2025 г.

### Для цитирования

Чукаева М. А., Петров Д. С., Малыгин Н. А. Использование белокрыльника болотного в условиях Севера для фиторемедиации промышленных сточных вод от металлов на примере АО «Карельский окатыш» // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 3. — С. 116—126. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-116-126.

По результатам оценки работы фитоочистных сооружений предприятия АО «Карельский окатыш» установлена их недостаточная эффективность в отношении удаления основных металлов-загрязнителей (Fe, Mn и Ni). Среди растений, отобранных с фитоматов, выявлена способность к аккумуляции указанных металлов у сабельника болотного (*Comarum palustre* L.) и рогоза широколистного (*Typha latifolia* L.). Коэффициенты биоаккумуляции для них составили  $BAF^{Fe} = 5860$ ,  $BAF^{Mn} = 13764$ ,  $BAF^{Ni} = 1242$  и  $BAF^{Fe} = 5150$ ,  $BAF^{Mn} = 19587$ ,  $BAF^{Ni} = 766$  соответственно. Для повышения эффективности работы фитоочистных сооружений авторы предлагают увеличить биоразнообразие используемых растений за счет внедрения белокрыльника болотного (*Calla palustris* L.) как автохтонного для северных территорий вида. По результатам модельного эксперимента установлены высокий токсикологический порог и фиторемедиационный потенциал данного вида растений в отношении указанных металлов. При этом в абсолютном выражении белокрыльник болотный лучше всего аккумулировал Fe, в относительном — Ni. По сравнению с контролем за четыре недели эксперимента концентрация Fe в тканях растения увеличилась на 1300 мг/кг сухого веса в растворе с концентрацией 5 мг/дм<sup>3</sup>. Концентрация Ni возросла более чем в 300 раз в растворе с концентрацией 0,5 мг/дм<sup>3</sup>.

**Ключевые слова:** фиторемедиация, биоаккумуляция, тяжелые металлы, белокрыльник болотный, сточные воды.

### Введение

Промышленное освоение северных регионов в большей степени проходило без учета уязвимости естественных экосистем к техногенным воздействиям и привело к истощению запасов пресных вод и ухудшению их качества [1—3]. Проблема загрязнения природных вод Арктической зоны тяжелыми металлами является особенно острой и имеет долгосрочные последствия для уникальной экоси-

стемы региона. Тяжелые металлы, такие как ртуть Hg, свинец Pb, кадмий Cd, мышьяк As, никель Ni, медь Cu и другие, обладают высокой токсичностью и способностью накапливаться в организмах, вызывая серьезные нарушения здоровья у животных и человека [4; 5]. Деятельность горных предприятий относится к основным источникам загрязнения природных вод тяжелыми металлами и характеризуется большим объемом сточных вод и неравномерностью их притока [6; 7].

© Чукаева М. А., Петров Д. С., Малыгин Н. А., 2025

Для удаления тяжелых металлов из сточных вод разработано и широко изучено множество методов, включая реагентные [8; 9], сорбционные и ионообменные [10; 11], мембранные [12] и электрохимические [13]. Однако их применение для глубокой очистки многотоннажных стоков предприятий горнопромышленного комплекса часто ограничено, прежде всего из-за их высокой стоимости [14]. В последнее время все больше внимания уделяется применению в очистке сточных вод природоподобных технологий, отличающихся экологичностью и экономичностью [15—17]. Создание фитоочистных сооружений оказывает комбинированное положительное воздействие на экосистемы, заключающееся помимо очистки сточных вод в улучшении связанности местообитаний [18]. Например, реализация 15-летнего проекта по созданию и изучению водно-болотных угодий для очистки шахтных вод привела к увеличению обилия и разнообразия простейших, высших растений, наземных животных и птиц [19]. В другом исследовании создание в водоеме искусственных плавучих островов для фиторемедиации повысило на 44% численность птенцов в популяции чернозобой гагары (*Cavia arctica*) [20].

В условиях Крайнего Севера применение технологий фиторемедиации ограничивается в первую очередь климатическими условиями, которые определяют короткий период вегетации водной растительности [21]. Тем не менее в [22] описан опыт многолетнего успешного применения фитоочистки сточных вод от соединений азота на предприятии АО «Олкон», расположенном в Мурманской области. Одним из предприятий Северо-Западного федерального округа, запустивших опытный проект по доочистке сточных вод от соединений азота методом фиторемедиации, является АО «Карельский окатыш». Результаты реализации этого природоохранного мероприятия не нашли отражения в опубликованных работах.

Второе ограничение применения методов фиторемедиации на практике касается перечня загрязнителей, которые способны удалять растения из сточных вод. Однако многие исследования посвящены экстракции тяжелых металлов, таких как Ni, Cu, Cd, Pb, Zn, Co и др., с использованием высшей водной растительности [23—25]. К водным растениям — гипераккумуляторам тяжелых металлов, способным накапливать их в количестве, превышающем 1% от сухого веса, относят пистию телорезовидную (*Pistia stratiotes* L.) [26; 27], сальвинию плавающую (*Salvinia natans* (L.) All.) [27], водяной гиацинт (*Eichhornia crassipes* M.) [28; 29], рогоз широколистный [30] и др. К сожалению, названные растения за исключением рогоза широколистного не произрастают в условиях Крайнего Севера. Кроме того, известно, что наиболее эффективные фиторемедиаторы обладают быстрыми темпами роста и высокой биомассой, однако за пределами естественного ареала растения с такими характеристиками часто считаются

инвазивными, и благодаря потенциалу к интенсивному колонизированию они могут быстро вытеснить местные виды [31]. Поэтому интродукция новых видов растений с целью фиторемедиации может нанести значительный ущерб пресноводным экосистемам и иметь неблагоприятные далеко идущие последствия.

Очевидно, что эффективным решением обозначенных проблем будет использование местных видов растений с высоким потенциалом к биоаккумуляции. Отметим также, что согласно ряду исследований совместное использование нескольких видов растений с разной корневой системой и разными сезонными моделями роста может существенно повысить эффективность работы фитоочистных сооружений [22; 32]. Поэтому поиск и изучение коренных для северных широт видов макрофитов, способных к аккумуляции тяжелых металлов, с перспективой их использования в фитоочистных сооружениях является актуальной задачей.

В связи с этим целью настоящего исследования стали изучение возможности применения белокрыльника болотного как автохтонного вида арктических экосистем для очистки сточных вод от тяжелых металлов, а также оценка перспективы использования существующих фитоочистных сооружений предприятия АО «Карельский окатыш» для снижения концентрации металлов.

Решение оценить фиторемедиационный потенциал белокрыльника болотного в условиях высоких широт было принято по ряду причин. Во-первых, ареал его распространения охватывает умеренные и холодные регионы Северного полушария [33]. Белокрыльник — неприхотливое, холодостойкое и теневыносливое прибрежное растение, оно относится к группе сплавинообразующих гигрогелофитов, быстро разрастается и хорошо размножается вегетативно [34]. Во-вторых, по результатам проведенных ранее мониторинговых исследований акватории реки Охта (Санкт-Петербург) авторы сделали предположение о способности белокрыльника болотного к аккумуляции тяжелых металлов [35]. В-третьих, данный вопрос остается малоизученным — по результатам литературного обзора найдена только одна публикация, посвященная оценке эффективности извлечения цезия  $^{137}\text{Cs}$  белокрыльником болотным из модельных растворов [36], в то же время есть упоминания о его применении в фитоочистных сооружениях для удаления из сточных вод соединений азота [22; 37; 38].

### Объекты и методы исследований

В качестве объекта исследования было выбрано предприятие АО «Карельский окатыш» — ведущий комбинат по добыче и переработке железной руды в России. Предприятие расположено в Республике Карелия и в настоящее время разрабатывает три месторождения: Костомукшское, Корпангское и Южно-Корпангское. Сброс очищенных карьерных

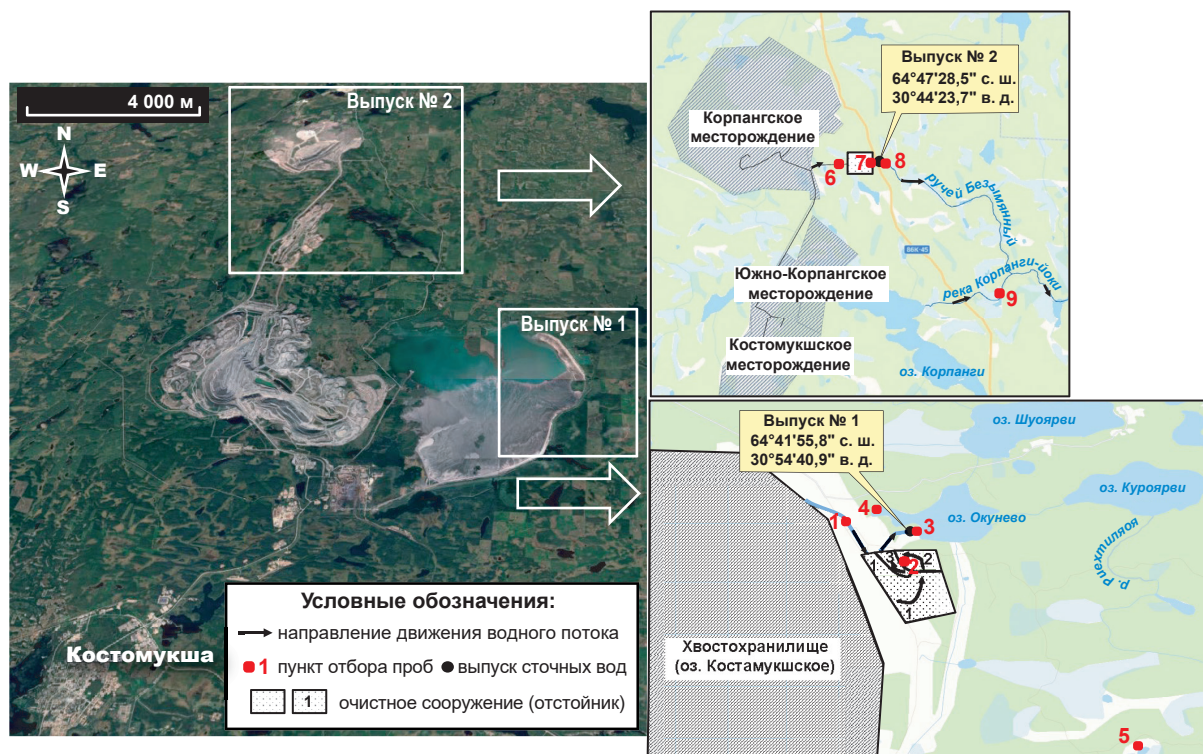


Рис. 1. Карта-схема расположения производственных объектов и очистных сооружений АО «Карельский окатыш» и пунктов отбора проб. Составлено авторами на картографической основе Google Maps

Fig. 1. Map-scheme of the location of JSC "Karelskiy Okatysh" production and treatment facilities and sampling points. Compiled by the authors based on Google Maps

вод Корпангского (Западный участок), Костомукшского (участок Северный-2) и Южно-Корпангского (участок Северный-3) месторождений осуществляется в ручье Безымянном (выпуск № 2), впадающем в реку Корпанги-йоки (рис. 1). Очистка сточных вод происходит в отстойнике, расположенном в центре заболоченного участка природной впадины рельефа, образованной дамбой обвалования и прилегающей к насыпи автодороги Костомукша — Вокнаволоок. В 2020 г. здесь внедрена система фитоочистки карьерных вод, направленная на снижение содержания соединений азота. Карьерные воды Центрального и Южного карьеров Костомукшского месторождения отводятся в хвостохранилище, принимающее также сточные воды обогатительной фабрики. Хвостохранилище оснащено системой оборотного водоснабжения, излишки после дополнительной очистки отводятся в озеро Окунеево (выпуск № 1), являющееся частью озерно-речной системы Кенти — Кенто (см. рис. 1). Дополнительная очистка сточных вод осуществляется во вторичном отстойнике, состоящем из трех последовательных секций, образованных тремя дамбами и соединенных трубами. В 2022 г. в третьей секции отстойника также внедрена фитоочистная система. Средние годовые расходы сточных вод по выпускам № 1 и № 2: 12 000—19 000 м<sup>3</sup>/год и 1200—1900 м<sup>3</sup>/год соответственно. Ручей Безымянный и озеро Оку-

неево — водные объекты второй категории рыбохозяйственного значения, относятся к Баренцево-Беломорскому бассейновому округу. К основным загрязнителям, поступающим в них в результате производственной деятельности предприятия, относятся соединения азота (нитрат-ион, нитрит-ион и ион аммония), взвешенные вещества, сульфат-ион, марганец Mn, железо Fe и никель Ni.

Суммарная площадь фитоочистных сооружений на АО «Карельский окатыш» составляет порядка 4000 м<sup>2</sup>. Они реализованы в виде плавающих фитомодулей из торфяного субстрата с болотной растительностью, преимущественно состоящей из мха рода Варнсторфия (*Warnstorfia fluitans* Loeske), рогоза широколистного, сабельника болотного, тростника обыкновенного (*Phragmites communis* Trin.), а также рдеста плавающего (*Potamogeton natans* L.) и ряски малой (*Lemna minor* L.). Так как часть отстойника перед выпуском № 2 находится на заболоченной местности, здесь фитоочистные сооружения также представлены участком водно-болотных угодий.

Для оценки эффективности работы фитоочистных сооружений в отношении удаления металлов в полевой сезон 2023 г. были проведены гидроэкологические исследования на девяти пунктах (см. рис. 1). Пункты опробования № 1—4 относились к выпуску № 1: пункт № 1 располагался в водосборном

коллекторе на выходе из хвостохранилища, пункт № 2 — на выходе из второй секции отстойника перед фитоочистными сооружениями, пункт № 3 — на озере Окуневое в контрольном створе выпуска № 1, пункт № 4 — в фоновом створе в восточной части озера Окуневое. Пункты опробования № 6—9 относились к выпуску № 2. Пункт № 6 был установлен в резервуаре-накопителе сточных вод, пункт № 7 — в отстойнике перед секцией фитоочистки, пункт № 8 — в контрольном створе в ручье Безымянном. Пункт № 9 был установлен в фоновом створе, расположенном на реке Корпанги-йоки в 500 м выше по течению до впадения в нее ручья Безымянный, так как последний формируется из очищенных сточных вод выпуска № 2. Во всех пунктах производился отбор проб воды. Кроме того, были отобраны образцы макрофитов с фитоочистных сооружений: рогоз широколистный и сабельник болотный рядом с пунктом № 2, мох рода Варнсторфия и тростник обыкновенный рядом с пунктом № 7. В качестве фонового объекта для отбора тех же видов макрофитов, а также белокрыльника болотного как автохтонного вида изучаемой территории, было выбрано водно-болотное угодье, расположенное за пределами непосредственного влияния производственных объектов. Здесь был установлен пункт № 5, в котором также производился отбор проб указанных растений и воды.

Пробы воды отбирались с глубины 20—30 см в полиэтиленовые бутылки, консервировались азотной кислотой до pH < 2 и охлаждались для последующего определения в них металлов. Пробы макрофитов сразу после отбора промывались дистиллированной водой, упаковывались в полиэтиленовые пакеты и охлаждались.

Дальнейшая пробоподготовка и анализ проводились в лаборатории НЦ «Экосистема». Пробы воды фильтровались через фильтр «синяя лента», после чего проводился разведочный и количественный анализ методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на ICPE-9000 (Shimadzu) в соответствии с М-02-1109-09. По результатам количественного определения поллютантов рассчитывался коэффициент контрастности по формуле

$$K_{\text{ПДК}_{\text{р.х.}}}^{\text{э}} = \frac{C^{\text{э}}}{\text{ПДК}_{\text{р.х.}}}, \quad (1)$$

где  $C^{\text{э}}$  — концентрация элемента в воде, мг/дм<sup>3</sup>;  $\text{ПДК}_{\text{р.х.}}$  — значение предельно допустимой концентрации для водных объектов рыбохозяйственной категории водопользования [38] для элемента, мг/дм<sup>3</sup>.

Пробы растений раскладывались на подносах в прохладном хорошо проветриваемом помещении вне доступа прямых солнечных лучей и высушивались до воздушно-сухого состояния. После этого растения измельчались в лабораторной мельнице, и проводилось их мокрое озоление. Навески мас-

сой 0,2 г помещали во фторопластовые сосуды, добавляли 2 см<sup>3</sup> концентрированной азотной кислоты и 2 см<sup>3</sup> перекиси водорода и оставляли на 1 ч для протекания реакции, после чего добавляли еще 2 см<sup>3</sup> концентрированной азотной кислоты и помещали сосуды в систему микроволнового разложения. Полученный раствор количественно переносили в мерные полиэтиленовые флаконы объемом 20 см<sup>3</sup> и доводили до метки дистиллированной водой. Для всех образцов велись две параллельные пробы, а также готовились холостые растворы с использованием тех же самых реактивов. Применяемые реактивы имели квалификацию «особо чистые», азотная кислота была предварительно очищена в системе субперегонки кислот Milestobe subCLEAN во избежание получения высоких значений холостых растворов. Продукты кислотного разложения анализировались методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на ICPE-9000 (Shimadzu). Для каждого элемента строилась градуировочная кривая. В качестве эталонного раствора использовался многоэлементный раствор ICP Sigma-Aldrich Merck (США). Влажность растений для пересчета содержания в них металлов на абсолютно-сухое состояние определялась на термогравиметрическом анализаторе LECO TGA-701.

Для макрофитов, отобранных на фитоочистных сооружениях (пункты № 2 и 7) и на фоновом участке (пункт № 5), производился расчет коэффициентов биоаккумуляции по формуле

$$\text{BAF} = \frac{C_{\text{р}}}{C_{\text{в}}}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{р}}$  — концентрация элемента в растении мг/кг;  $C_{\text{в}}$  — концентрация элемента в воде мг/дм<sup>3</sup>.

Для постановки эксперимента по фиторемедиации сточных вод белокрыльником болотным были отобраны перезимовавшие образцы растений с последующим размещением в питательной среде с целью акклиматизации и дальнейшей селекции качественных экземпляров, исключающей влияние заболеваний, преждевременное гниение и гибель. Питательная среда представляла собой 0,2%-ный раствор одноосновного фосфата калия. Адаптация растений проходила в течение двух недель. Контейнеры с растениями помещали в вентилируемый фитостеллаж, где поддерживалась постоянная температура +15...+18°C днем и +5...+8°C ночью. Фотопериод имел продолжительность 10 ч, а средняя плотность потока фотосинтетически активной радиации (ФАР) равнялась 100 мкмоль/(м<sup>2</sup>·с). После прохождения адаптационного периода здоровые растения, вышедшие из состояния анабиоза, в равной пропорции (массой 230—260 г) размещались в контейнерах объемом 5 л и заливались модельными растворами с концентрацией тяжелых металлов, в 10 и 50 раз превышающей  $\text{ПДК}_{\text{р.х.}}$  ( $C_{\text{Mn}} = 0,1$  мг/дм<sup>3</sup>,  $C_{\text{Ni}} = 0,1$  мг/дм<sup>3</sup>,  $C_{\text{Fe}} = 1$  мг/дм<sup>3</sup> и  $C_{\text{Mn}} = 0,5$  мг/дм<sup>3</sup>,

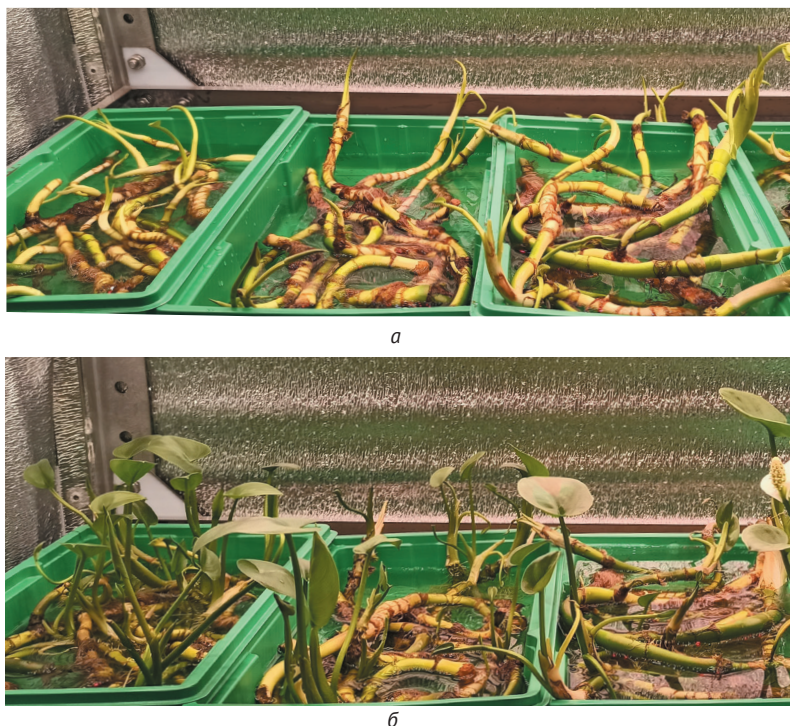


Рис. 2. Белокрыльник болотный после адаптации (а) и в период активного роста (б)  
Fig. 2. *Calla Palustris* after adaptation (a) and during the active growth period (b)

$C_{Ni} = 0,5 \text{ мг/дм}^3$ ,  $C_{Fe} = 5 \text{ мг/дм}^3$ ), что соответствует их содержанию в сточных водах предприятия АО «Карельский окатыш» (рис. 2). Одновременно проводился контрольный опыт, где в качестве среды для растений использовался питательный раствор.

Каждые 4 дня полностью заменялись модельные растворы, исходя из среднего времени гидравлической задержки в плавающих фитоочистных сооружениях. Повторность в опыте на каждый вариант была трехкратная. Продолжительность эксперимента составила 28 дней. По истечении этого периода растения извлекались из контейнеров, тщательно промывались дистиллированной водой, затем подготавливались и анализировались аналогично тому, как описано выше.

### Результаты и обсуждения

По результатам разведочного анализа в пробах воды не было обнаружено тяжелых металлов в значимых содержаниях, кроме указанных в качестве основных загрязнителей сточных вод предприятия АО «Карельский окатыш» (Mn, Fe и Ni), поэтому количественно определялись только указанные элементы (табл. 1).

Наибольшие значения коэффициентов контрастности по всем исследуемым компонентам наблюдаются в карьерных водах (выпуск № 2). Эффективность

Таблица 1. Содержание основных металлов-загрязнителей в поверхностных водах исследуемой территории

Table 1. Content of the main metal pollutants in surface waters of the study area

| Пункт опробования                               | Mn,<br>мг/дм <sup>3</sup> | $K_{\text{ПДК р.х.}}^{\text{Mn}}$ | Ni,<br>мг/дм <sup>3</sup> | $K_{\text{ПДК р.х.}}^{\text{Ni}}$ | Fe,<br>мг/дм <sup>3</sup> | $K_{\text{ПДК р.х.}}^{\text{Fe}}$ |
|-------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Выпуск № 1                                      |                           |                                   |                           |                                   |                           |                                   |
| № 1. Водосборный коллектор                      | 0,083                     | 8,3                               | 0,025                     | 2,5                               | 0,65                      | 6,5                               |
| № 2. Вход в третью секцию вторичного отстойника | 0,079                     | 7,9                               | 0,025                     | 2,5                               | 0,46                      | 4,6                               |
| № 3. Контрольный створ (озеро Окуновое)         | 0,047                     | 4,7                               | 0,017                     | 1,7                               | 0,28                      | 2,8                               |
| № 4. Фоновый створ (озеро Окуновое)             | 0,037                     | 3,7                               | 0,013                     | 1,3                               | 0,28                      | 2,8                               |
| № 5. Водно-болотные угодья (фон)                | 0,049                     | 4,9                               | 0,0050                    | 0,5                               | 0,37                      | 3,7                               |
| Выпуск № 2                                      |                           |                                   |                           |                                   |                           |                                   |
| № 6. Резервуар накопитель сточных вод           | 0,39                      | 39,0                              | 0,23                      | 23,0                              | 0,80                      | 8,0                               |
| № 7. Отстойник до фитоочистки                   | 0,34                      | 34                                | 0,22                      | 22                                | 0,56                      | 5,6                               |
| № 8. Контрольный створ (ручей Безымянный)       | 0,27                      | 27                                | 0,18                      | 18                                | 0,43                      | 4,3                               |
| № 9. Фоновый створ (река Корпанги-йоки)         | 0,046                     | 4,6                               | 0,0027                    | 0,27                              | 0,21                      | 2,1                               |
| ПДК <sub>р.х.</sub>                             | 0,01                      | —                                 | 0,01                      | —                                 | 0,1                       | —                                 |

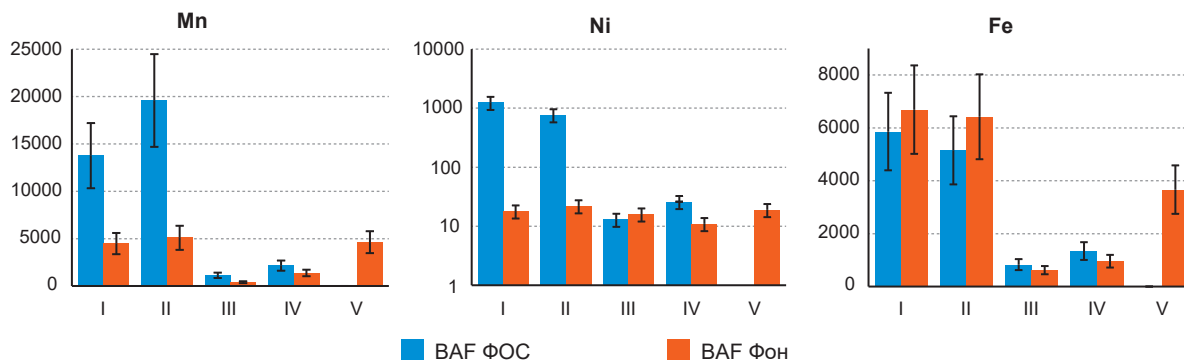


Рис. 3. Коэффициенты биоаккумуляции макрофитов, отобранных с фитоочистных сооружений (BAF ФОС) и фоновое водно-болотного угодья (BAF Фон); I – рогоз, II – сабельник, III – тростник обыкновенный, IV – мох, V – белокрыльник  
Fig. 3. Bioaccumulation coefficients of macrophytes collected from phytotreatment facilities (BAF PTF) and background wetland (BAF BG); I – *Typha Latifolia*, II – *Comarum Palustre*, III – *Phragmites Communis*, IV – *Warnstorfia Fluitans*, V – *Calla Palustris*

очистки сточных вод в отстойниках за счет процессов седиментации невысокая по Mn, чуть выше по Fe и практически отсутствует по Ni, снижение коэффициентов контрастности происходит в 1,05—1,15, 1,40—1,43 и 1,00—1,05 раза соответственно. При этом можно отметить более эффективную работу фитоочистных сооружений, где коэффициенты контрастности по исследуемым компонентам снижаются в 1,26—1,68 раза по Mn, в 1,30—1,64 раза по Fe и в 1,22—1,47 раза по Ni. Однако в контрольных створах по всем загрязнителям отмечено превышение ПДК<sub>р.х.</sub>, что свидетельствует о необходимости модернизации системы очистки сточных вод. Также следует отметить, что фоновые значения по Mn и Fe также превышают значения ПДК<sub>р.х.</sub>, что связано, вероятно, с естественным гидрохимическим режимом природных вод, наличием торфов и заболоченных территорий, способствующих обогащению вод растворенным органическим веществом и накоплению данных элементов.

Массовые содержания металлов в макрофитах, отобранных с фитоочистных сооружений (ФОС) предприятия и с фоновое водно-болотного угодья (фон), представлены в табл. 2, значения коэффициентов биоаккумуляции — на рис. 3.

Как видно на рис. 3, наибольшие коэффициенты биоаккумуляции по всем металлам отмечены для рогоза и сабельника, наименьшие — для тростника. Для всех изученных макрофитов коэффициенты биоаккумуляции по Fe сопоставимы для растений, отобранных с фоновых участков и с фитоочистных сооружений, это обусловлено высоким содержи-

Таблица 2. Массовая концентрация Fe, Mn и Ni в исследованных образцах макрофитов в пересчете на абсолютно сухое состояние

Table 2. Mass concentration of Fe, Mn and Ni in the studied macrophyte samples in terms of absolutely dry state

| Пункт     | Макрофит              | Fe, мг/кг | Mn, мг/кг | Ni, мг/кг |
|-----------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|
| № 2 (ФОС) | Рогоз широколистный   | 3282      | 4680      | 273       |
| № 5 (фон) |                       | 2475      | 219       | 0,09      |
| № 2 (ФОС) | Сабельник болотный    | 2884      | 6660      | 169       |
| № 5 (фон) |                       | 2375      | 249       | 0,11      |
| № 7 (ФОС) | Тростник обыкновенный | 382       | 89        | 0,33      |
| № 5 (фон) |                       | 229       | 20        | 0,08      |
| № 7 (ФОС) | Мох рода Варнсторфия  | 617       | 170       | 0,7       |
| № 5 (фон) |                       | 354       | 67        | 0,06      |
| № 5 (фон) | Белокрыльник болотный | 1356      | 227       | 0,10      |

ем железа как в фоновых водно-болотных угодьях, так и в сточных водах:  $K_{\text{ПДК}_{\text{р.х.}}}^{\text{Fe}} = 3,7 — 5,6$  соответственно. Однако уже на примере Fe можно отметить тенденцию к активному его накоплению рогозом и сабельником, и к незначительному — тростником и мхом. Наиболее отчетливо тенденция к гипераккумуляции металлов рогозом и сабельником проявляется для Mn и Ni, коэффициенты биоаккумуляции по этим металлам у растений, отобранных с фитоочистных сооружений, больше, чем у растений, отобранных с фоновое водно-болотного угодья, в 4—35 раз (для рогоза) и в 3—70 раз (для сабельника) соответственно. Для исследованных образцов мха, отобранных с фоновой территории и фитоочистных сооружений, наблюдается схожая тенденция, однако коэффициенты биоаккумуляции по Mn и Ni отличаются лишь в 1,6—2,4 раза соответствен-

но, что, вероятно, связано не только с его меньшей способностью к аккумуляции металлов, но и с более низким их содержанием в сточных водах выпуска № 1. Для тростника ситуация аналогична. Таким образом, можно сделать вывод, что из исследованных макрофитов, применяемых на предприятии АО «Карельский окатыш» для фитоочистки от соединений азота, рогоз и сабельник показали высокую эффективность и в удалении из сточных вод металлов. Однако, как видно из табл. 1, этого недостаточно для достижения в контрольных створах нормативных значений. Для повышения эффективности работы фитоочистных сооружений необходимо повысить видовое разнообразие растений — гипераккумуляторов металлов и увеличить время гидравлической задержки.

Результаты исследования образцов белокрыльника, отобранных с фоновой территории, свидетельствуют о его высоком потенциале к аккумуляции металлов: значения коэффициентов биоаккумуляции по Mn и Ni сравнимы с соответствующими значениями, полученными для рогоза и сабельника, продемонстрировавших значительную способность к экстракции металлов из загрязненных сточных вод. Данное предположение подтверждается результатами проведенного эксперимента, представленными в табл. 3.

**Таблица 3. Средняя массовая концентрация Fe, Mn и Ni в образцах белокрыльника через 28 дней экспозиции в пересчете на абсолютно сухое состояние**

**Table 3. Average mass concentration of Fe, Mn and Ni in *Calla Palustris* samples after 28 days of exposure, calculated on a dry basis**

| Кратность превышения ПДК <sub>РХ</sub> , концентрация Fe/Mn/Ni в модельном растворе, мг/дм <sup>3</sup> | Fe, мг/кг | Mn, мг/кг | Ni, мг/кг |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 50 раз, 5/0,5/0,5                                                                                       | 1568      | 265       | 47        |
| 10 раз, 1/0,1/0,1                                                                                       | 655       | 201       | 16        |
| Контроль                                                                                                | 263       | 117       | 0,15      |

Как видно из табл. 3, все изучаемые металлы были обнаружены в контрольных образцах растений, культивируемых в питательном растворе без добавления токсикантов. Это объясняется тем, что Fe, Mn и Ni — эссенциальные микроэлементы для растений, участвующие во множестве важных физиологических и биохимических процессов, однако их избыток может приводить к серьезным нарушениям в росте и развитии [39]. Поэтому важно отметить, что в образцах белокрыльника, выращенных в питательном растворе и в растворах, содержащих значительные концентрации металлов, не было зафиксировано

значимых различий в приросте биомассы и во внешнем виде (не было отмечено замедления развития, следов некроза, пожелтения листьев и т. д.). При этом из табл. 3 видно, что белокрыльник активно накапливает изученные металлы из загрязненных модельных растворов. Наиболее сильно способность к аккумуляции проявилась в отношении Ni: кратность его массового содержания в образцах, выращенных в растворах с превышением ПДК<sub>РХ</sub>, в 10 и 50 раз больше контроля и составляет соответственно 107—313 раз.

### Заключение и выводы

По результатам экологических исследований водных объектов, находящихся в зоне воздействия предприятия АО «Карельский окатыш», можно сделать вывод о перспективности использования технологии фиторемедиации для очистки сточных вод от металлов. Среди используемых макрофитов наибольшие коэффициенты биоаккумуляции металлов были установлены для рогоза и сабельника. Однако существующая на предприятии система фитоочистки не обеспечивает снижение концентраций Fe, Mn и Ni до нормативных значений и требует модернизации. Необходимо увеличить площадь фитоочистных сооружений и время гидравлической задержки в них очищаемых вод, а также повысить биоразнообразие используемой растительности автохтонными видами — гипераккумуляторами металлов, среди которых авторами был предложен белокрыльник болотный. Проведенные экспериментальные исследования доказали его фиторемедиационный потенциал.

Было установлено, что белокрыльник обладает высоким токсикологическим порогом в отношении Fe, Mn и Ni и, следовательно, устойчив к возможным аномальным загрязнениям, перенося их без видимых функциональных изменений. По завершении опыта не было отмечено разницы в росте и развитии растений в растворах с концентрациями Fe, Mn и Ni, превышающими ПДК<sub>РХ</sub> в 10 и 50 раз, что достоверно выше их содержания в сточных водах предприятия на всех стадиях очистки. Концентрации поллютантов в сухой массе образцов растений коррелируют с содержанием металлов в модельных растворах, что указывает на высокую способность к их аккумуляции, проявляемую белокрыльником. В абсолютном выражении белокрыльник болотный лучше всего накапливал Fe. За четыре недели эксперимента концентрация в тканях растения увеличилась на 1300 мг/кг сухого веса в растворе с концентрацией 5 мг/дм<sup>3</sup>. В относительном выражении белокрыльник лучше всего аккумулировал Ni, концентрация которого возросла более чем в 300 раз в растворе с концентрацией 0,5 мг/дм<sup>3</sup>.

Другим его важным преимуществом является способность сохранять жизнеспособность и давать стабильный прирост биомассы при низких температурах, что особенно важно в условиях Севера.

Кроме того, белокрыльник легко культивируется и может образовывать устойчивые ассоциации с другими видами растений, в том числе с часто используемыми для фиторемедиации (рогоз, сабельник, камыш и др.).

В проведенных экспериментах перечень металлов, в отношении которых изучалась способность белокрыльника к аккумуляции, ограничивался приоритетными загрязнителями сточных вод предприятия АО «Карельский окатыш» (Fe, Mn и Ni), однако можно предположить его потенциал к накоплению и других тяжелых металлов, например, Cu, Zn, Pb и др. Интересным также представляется изучение динамики накопления металлов белокрыльником в течение более длительного времени. Таким образом, белокрыльник болотный является перспективным аккумулятором металлов для внедрения в фитоочистные системы предприятий, расположенных в северных широтах.

### Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования России (FSRW-2024-0005 «Новые подходы к проведению экологического мониторинга арктических экосистем, подверженных влиянию объектов минерально-сырьевого комплекса, и разработка технологий их комплексного восстановления»).

### Литература/References

1. Дмитриева Д. М., Чанышева А. Ф. Вклад добывающих компаний в устойчивое развитие минерально-сырьевой базы Арктического региона: новый подход к оценке и взаимодействию ключевых акторов // Север и рынок: формирование экон. порядка. — 2024. — Т. 27, № 2. — С. 71—87. — DOI: 10.37614/2220-802X.2.2024.84.006.  
Dmitrieva D. M., Chanysheva A. F. Contribution of mining companies to the sustainable development of the mineral resource base in the arctic region: a new approach to ranking key actors and assessing their interaction. Sever i Rynok: Formirovanie Ekonomicheskogo Poryadka, 2024, vol. 27, no. 2, pp. 71—87. DOI: 10.37614/2220-802X.2.2024.84.006. (In Russian).  
2. Romasheva N. V., Babenko M. A., Nikolaichuk L. A. Sustainable Development of the Russian Arctic Region: Environmental Problems and Ways to Solve Them. Mining Informational and Analytical Bull., 2022, vol. 10, no. 2, pp. 78—87. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_102\_0\_78.  
3. Кашулин Н. А., Беккелунд А., Даувальтер В. А. Долговременные изменения химических параметров и цветение вредоносных водорослей в арктическом озере Имандра // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 3. — С. 327—340. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-327-340.  
Kashulin N. A., Bekkelund A., Dauvalter V. A. Long-term hydrochemical changes and “Harmful Algal Blooms” in the Arctic Lake Imandra. Arctic: Ecology

and Economy, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 327—340. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-327-340. (In Russian).  
4. Matveeva V. A., Alekseenko A. V., Karthe D., Puzanov A. V. Manganese pollution in mining-influenced rivers and lakes: Current state and forecast under climate change in the Russian Arctic. Water, 2022, vol. 14, no. 7. DOI: 10.3390/w14071091.  
5. Базова М. М., Кошевой Д. В. Оценка современного состояния качества вод Норильского промышленного района // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 3 (27). — С. 49—60. — DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-49-60.  
Bazova M. M., Koshevoi D. V. The assessment of the current state of water quality in the Norilsk industrial region. Arctic: Ecology and Economy, 2017, no. 3 (27), pp. 49—60. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-49-60. (In Russian).  
6. Харько П. А., Данилов А. С. Оценка эффективности нейтрализации и очистки кислых вод от металлов золой при использовании альтернативного топлива из коммунальных отходов // Зап. Гор. ин-та. — 2024. — EDN: CGGRHJ.  
Kharko P. A., Danilov A. S. Evaluation of the effectiveness of neutralization and purification of acidic waters from metals with ash when using alternative fuels from municipal waste. J. of Mining Institute, 2024. EDN: CGGRHJ. (In Russian).  
7. Сверчков И. П., Поваров В. Г. Количественное определение форм серы в донных отложениях для экспресс-оценки влияния промышленных объектов на водные экосистемы // Зап. Гор. ин-та. — 2024. — Т. 267. — С. 372—380. — EDN: PUUADY.  
Sverchkov I. P., Povarov V. G. Quantitative determination of sulfur forms in bottom sediments for rapid assessment of the industrial facilities impact on aquatic ecosystems. J. of Mining Institute, 2024, vol. 267, pp. 372—380. EDN: PUUADY. (In Russian).  
8. Sun Y., Zhou S., Pan S.-Y., Zhu S., Yu Y., Zheng H. Performance evaluation and optimization of flocculation process for removing heavy metal. Chemical Engineering J., 2019, p. 123911. DOI: 10.1016/j.cej.2019.123911.  
9. Зубкова О. С., Алексеев А. И., Залилова М. М. Исследования совместного применения углеродсодержащих и алюминий-содержащих соединений для очистки сточных вод // Изв. вузов. Химия и хим. технология. — 2020. — Т. 63 (4). — С. 86—91. — DOI: 10.6060/ivkkt.20206304.6131.  
Zubkova O. S., Alekseev A. I., Zalilova M. M. Research of combined use of carbon and aluminum compounds for wastewater treatment. Chem Chem Tech., 2020, vol. 63 (4), pp. 86—91. DOI: 10.6060/ivkkt.20206304.6131. (In Russian).  
10. Chakraborty R., Asthana A., Singh A. K., Jain B., Susan A. B. H. Adsorption of heavy metal ions by various low-cost adsorbents: A review. Intern. J. of Environmental Analytical Chemistry, 2020, pp. 1—38. DOI: 10.1080/03067319.2020.1722811.  
11. Антонинова Н. Ю., Собенин А. В., Усманов А. И., Шепель К. В. Оценка возможности использова-

- ния отходов железо-магниевого производства для очистки сточных вод от тяжелых металлов ( $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ) // Зап. гор. ин-та. — 2023. — Т. 260. — С. 257—265. — DOI: 10.31897/PMI.2023.34.
- Antoninova N. Yu., Sobenin A. V., Usmanov A. I., Shepel K. V. Assessment of the possibility of using iron-magnesium production waste for wastewater treatment from heavy metals ( $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ). J. of Mining Institute, 2023, vol. 260, pp. 1—10. DOI: 10.31897/PMI.2023.34.
12. Abdullah N., Yusof N., Lau W. J., Jaafar J., Ismail A. F. Recent trends of heavy metal removal from water/wastewater by membrane technologies. J. of Industrial and Engineering Chemistry, 2019, vol. 76, pp. 17—38. DOI: 10.1016/j.jiec.2019.03.029.
13. Qasem N. A. A., Mohammed R. H., Lawal D. U. Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. Clean Water, 2021, vol. 4, pp. 1—15. DOI: 10.1038/s41545-021-00127-0.
14. Maarof H. I., Daud W. M. A. W., Aroua M. K. Recent trends in removal and recovery of heavy metals from wastewater by electrochemical technologies. Reviews in Chemical Engineering, 2017, vol. 33 (4), pp. 359—386. DOI: 10.1515/REVCE-2016-0021.
15. Опекунов А. Ю., Коршунова Д. В., Опекунова М. Г. и др. Анализ эффективности геохимических барьеров как основа применения природоподобных технологий очистки воды // Зап. Гор. ин-та. — 2024. — Т. 267. — С. 343—355. — EDN: KKNLQG.
- Opekunov A. Yu., Korshunova D. V., Opekunova M. G., Somov V. V., Akulov D. A. Analysis of the geochemical barriers effectiveness as the basis for the use of nature-like water purification technologies. J. of Mining Institute, 2024, vol. 267, pp. 343—355. EDN: KKNLQG. (In Russian).
16. Пашкевич М. А., Коротаева А. Э. Оценка эффективности процесса фитоэкстракции при очистке карьерных сточных вод // Гор. информ.-аналит. бюл. — 2022. — № 6—1. — С. 349—360. — DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_61\_0\_349.
- Pashkevich M. A., Korotaeva A. E. Evaluation of the efficiency of the phytoextraction process in the quarry wastewater treatment. Mining Informational and Analytical Bull., 2022, vol. 6—1, pp. 349—360. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_61\_0\_349. (In Russian).
17. Sergeev V., Balandinsky D., Romanov G., Rukin G. Sorption treatment of water from chromium using biochar material. Arab J. of Basic and Applied Sciences, 2023, vol. 30 (1), pp. 299—306. DOI: 10.1080/25765299.2023.2207407.
18. Ильин Г. В., Усягина И. С., Макаров М. В. и др. Биосорбция техногенных радионуклидов баренцевоморской литоральной водорослью *Fucus vesiculosus* L. // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 4. — С. 536—548. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-536-548.
- Ilyin G. V., Usyagina I. S., Makarov M. V., Matishov G. G., Voskoboinikov G. M., Salakhov D. O. Biosorption of technogenic radionuclides by the Barents Sea littoral algae *Fucus vesiculosus* L. Arctic: Ecology and Economy, 2024, vol. 14, no. 4, pp. 536—548. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-536-548. (In Russian).
19. Yang B., Lan C. Y., Yang C. S., Liao W. B., Chang H., Shu W. S. Long-term efficiency and stability of wetlands for treating wastewater of a lead/zinc mine and the concurrent ecosystem development. Environmental Pollution, 2006, vol. 143, pp. 499—512. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.11.045.
20. Hancock M. Artificial floating islands for nesting Black-throated Divers *Gavia arctica* in Scotland: construction, use and effect on breeding success. Bird Study, 2010, vol. 1 (2), pp. 165—175. DOI: 10.1080/00063650009461172.
21. Kristanti R. A., Hadibarata T. Phytoremediation of contaminated water using aquatic plants, its mechanism and enhancement. Current Opinion in Environmental Science & Health, 2023, vol. 32, p. 100451. DOI: 10.1016/j.coesh.2023.100451.
22. Иванова Л. А., Мязин В. А., Корнейкова М. В. и др. Пора очищать Арктику. Создание фитоочистной системы для доочистки сточных вод горнорудных предприятий от минеральных соединений азота. — Апатиты: Изд-во Кольского науч. центра, 2021. — 88 с.
- Ivanova L. A., Myazin V. A., Korneikova M. V., Fokina N. V., Evdokimova G. A., Redkina V. V. It's time to clean up the Arctic. Creation of a phyto-purification system for post-treatment of wastewater from mining enterprises from mineral nitrogen compounds. Apatity, Publ. House of the Kola Scientific Center, 2021, 88 p. (In Russian).
23. Enochs B., Meindl G., Shidemantle G., Wuerthner V., Akerele D., Bartholomew A. et al. Short and longterm phytoremediation capacity of aquatic plants in Cu-polluted environments. Heliyon, 2023, vol. 9, p. e12805. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e12805.
24. Kristanti R. A., Hadibarata T. Phytoremediation of contaminated water using aquatic plants, its mechanism and enhancement. Current Opinion in Environmental Science & Health, 2023, vol. 32, p. 100451. DOI: 10.1016/j.coesh.2023.100451.
25. Wibowo Y. G., Nugraha A. T., Rohman A. Phytoremediation of several wastewater sources using *Pistia stratiotes* and *Eichhornia crassipes* in Indonesia. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 2023, vol. 20, p. 100781. DOI: 10.1016/j.enmm.2023.100781.
26. Сорокина Г. А., Злобина Е. В., Бондарева Л. Г., Субботин М. А. Оценка возможности использования пистии телорезовидной (*Pistia stratiotes*) и ряски малой (*Lemna minor*) для фиторемедиации водной среды // Вестн. КрасГАУ. — 2013. — № 11. — С. 182—186. — EDN: SCVIVJ.
- Sorokina G. A., Zlobina E. V., Bondareva L. G., Subbotin M. A. Assessment of the possibility of using *Pistia stratiotes* and duckweed (*Lemna minor*) for phytoremediation of the aquatic environment. Bull. of KrasGAU, 2013, no. 11, pp. 182—186. EDN: SCVIVJ. (In Russian).
27. Fonseka W., Gunatilake S. K., Jayawardana J. M. C. K., Wijesekara H. Analyzing the Efficacy of *Salvinia mo-*

- lesta and Pistia stratiotes as Phytoremediation Agent for Heavy Metals. KDU J. of Multidisciplinary Studies, 2023, vol. 5 (2), pp. 33—44. DOI: 10.4038/kjms.v5i2.75.
28. Минаева О. М., Акимова Е. Е., Минаев К. М. Поглощение ряда тяжелых металлов из водных растворов растениями водного гиацинта (*Eichhornia crassipes* (mart.) Solms) // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. — 2009. — № 4 (8). — С. 106—111. — EDN: LAIZOB.
- Minaeva O. M., Akimova E. E., Minaev K. M. Absorption of a number of heavy metals from aqueous solutions by aquatic hyacinth plants (*Eichhornia crassipes* (mart.) Solms). Bull. of Tomsk State University. Biology, 2009, no. 4 (8), pp. 106—111. EDN: LAIZOB. (In Russian).
29. Rezaei S., Ponraj M., Talaiekhosani A., Mohamad S. E., Md Din M. F., Taib S. M., Sairan F. M. Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater. J. of Environmental Management, 2015, vol. 163, pp. 125—133. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.08.018.
30. Chitimus A. D., Nedeff V., Sandu I., Radu C., Mosnegutu E., Sandu I. G., Barsan N. Absorption Capacity of Heavy Metals in the Case of Typha Latifolia Plant Species. Revista de Chimie, 2019, vol. 70 (8), pp. 3058—3061. DOI: 10.37358/RC.19.8.7487.
31. Chambers P. A., Lacoul A. P., Murphy A. K. J., Thomaz A. S. M., Lacoul P., Murphy K. J., Thomaz S. M. Global diversity of aquatic macrophytes in freshwater. Hydrobiologia, 2008, vol. 595, pp. 9—26. DOI: 10.1007/s10750-007-9154-6.
32. Wang G. X., Zhang L. M., Chua H., Li X. D., Xia M. F., Pu P. M. A mosaic community of macrophytes for the ecological remediation of eutrophic shallow lakes. Ecological Engineering, 2009, vol. 35 (4), pp. 582—590. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.06.006.
33. Кучеров И. Б., Зверев А. А., Чиненко С. В. Ценоотические позиции арктических и арктоальпийских видов растений в сообществах таежной зоны Европейской России // Растит. мир Азиат. России: Вестн. Центр. сибир. ботан. сада СО РАН. — 2023. — Т. 16, № 3. — С. 191—216. — DOI: 10.15372/RMAR20230301.
- Kucherov I. B., Zverev A. A., Chinenko S. V. Cenotic positions of Arctic and Arctic Alpine plant species in communities of the taiga zone of European Russia. Flora of Asian Russia: Bulletin of the Central Siberian Botanical Garden SB RAS, 2023, vol. 16, no. 3, pp. 191—216. DOI: 10.15372/RMAR20230301. (In Russian).
34. Dudas M., Slezak M., Hrivnak R. Distribution, ecology and vegetation affinity of bog arum (*Calla palustris*) in Slovakia. Biologia, 2021, vol. 76, pp. 2021—2029. DOI: 10.1007/s11756-021-00779-w.
35. Petrov D. S., Korotaeva A. E., Pashkevich M. A., Chukaeva M. A. Assessment of heavy metal accumulation potential of aquatic plants for bioindication and bioremediation of aquatic environment. Environ Monit Assess, 2023, vol. 195, no. 122. DOI: 10.1007/s10661-022-10750-0.
36. Rinaldi F., Kominkova D., Berchova K., Daguenet J., Pecharova E. Stable cesium ( $^{133}\text{Cs}$ ) uptake by *Calla palustris* from different substrates. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, vol. 139, pp. 301—307. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.01.048.
37. Патент № 2560631. Российская Федерация, МПК C02F 3/32 (2006.01), E02B 15/04 (2006.01). Устройство для биологической очистки сточных карьерных вод: № 2014122204/13; заявл. 30.05.2014; опубл. 20.08.2015 / Евдокимова Г. А., Иванова Л. А., Мязин В. А. — 10 с.
- Patent № 2560631 Russian Federation, IPC C02F 3/32 (2006.01), E02B 15/04 (2006.01). Device for biological wastewater treatment of quarry waters: № 2014122204/13; application 30.05.2014; published 20.08.2015 / Evdokimova G. A., Ivanova L. A., Miazin V. A. 10 p. (In Russian).
38. Иванова Л. А., Мязин В. А., Корнейкова М. В. Пути повышения эффективности доочистки сточных карьерных вод от минеральных соединений азота в условиях Кольского Севера // Тр. Ферсман. науч. сессии ГИ КНЦ РАН. — 2018. — № 15. — С. 456—459. — DOI: 10.31241/FNS.2018.15.116.
- Ivanova L. A., Miazin V. A., Korneikova M. V. Ways to increase the efficiency of post-treatment of waste quarry waters from mineral nitrogen compounds in the conditions of the Kola North. Proceedings of the Fersman scientific session of the GI KSC RAS, 2018, no. 15, pp. 456—459. DOI: 10.31241/FNS.2018.15.116. (In Russian).
39. Alloway B. J. Micronutrient Deficiencies in Global Crop Production: An Introduction. Micronutrient Deficiencies in Global Crop Production. [S. l.], Springer, 2008, pp. 1—39. DOI: 10.1007/978-1-4020-6860-7.

### Информация об авторах

**Чукаева Мария Алексеевна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории МЭО НЦ «Экосистема», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (199106, Россия, Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д. 2), e-mail: chukaeva\_ma@pers.spmi.ru.

**Петров Денис Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры геоэкологии, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (199106, Россия, Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д. 2).

**Малыгин Никита Алексеевич**, специалист по охране труда ООО «Элком» (192102, Россия, Санкт-Петербург, Витебская Сортировочная ул., д. 34, стр. 3).

## THE USE OF THE *CALLA PALUSTRIS* FOR PHYTOREMEDIATION OF INDUSTRIAL WASTEWATER FROM METALS IN THE CONDITIONS OF THE NORTH ON THE EXAMPLE OF JSC “KARELSKIY OKATYSH”

Chukaeva, M. A.<sup>1</sup>, Petrov, D. S.<sup>1</sup>, Malygin, N. A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Mining University (Saint Petersburg, Russian Federation)

<sup>2</sup> LLC “Elcom” (Saint Petersburg, Russian Federation)

The article was received on March 5, 2025

### For citing

Chukaeva M. A., Petrov D. S., Malygin N. A. The use of the *Calla Palustris* for phytoremediation of industrial wastewater from metals in the conditions of the North on the example of JSC “Karelskiy Okatysh”, Arctic: Ecology and Economy, 2025, vol. 15, no. 3, pp. 116—126. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-116-126. (In Russian).

### Abstract

The authors have assessed the efficiency of phyto-treatment facilities of JSC “Karelsky Okatysh” located in the Republic of Karelia, and have found out insufficient degree of wastewater treatment for the main metal pollutants (Fe, Mn and Ni). Among the plants used at phytoremediation facilities, the ability to accumulate the specified metals has been revealed in marsh cinquefoil and broadleaf cattail (*Comarum palustre* and *Typha latifolia*). The bioaccumulation coefficients for plants sampled from phytomats are the following:  $BAF^{Fe} = 5860$ ,  $BAF^{Mn} = 13764$ ,  $BAF^{Ni} = 1242$  and  $BAF^{Fe} = 5150$ ,  $BAF^{Mn} = 19587$ ,  $BAF^{Ni} = 766$ , respectively. To increase the efficiency of phytoremediation facilities, the authors suggest using marsh calla (*Calla Palustris*) as an autochthonous species for northern territories. The model experiment results have revealed that this plant species has a high level of tolerance to these metals and possesses the potential for phytoremediation. *Calla Palustris* most effectively accumulate Fe in absolute terms, and Ni in relative terms. Compared with the reference data, during the 4 weeks of the experiment, the concentration of Fe in plant tissues increased by 1300 mg/kg of dry weight when grown in a solution with a concentration of 5 mg/dm<sup>3</sup>. The concentration of Ni in plant tissues increased by more than 300 times when grown in a solution with a concentration of 0.5 mg/dm<sup>3</sup>.

**Keywords:** phytoremediation, bioaccumulation, heavy metals, *Calla Palustris*, sewage.

### Funding

The research was carried out within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSRW-2024-0005 “New approaches to environmental monitoring of Arctic ecosystems affected by mineral resource complex facilities and development of technologies for their comprehensive restoration”).

### Information about the authors

Chukaeva, Mariya Alexeevna, PhD of Engineering, Senior Researcher of Scientific Center “Ecosystem”, Saint Petersburg Mining University (2, 21 liniya V.O., St. Petersburg, Russia, 199106), e-mail: chukaeva\_ma@pers.spmi.ru.

Petrov, Denis Sergeevich, PhD of Engineering, Associate Professor of the Department of Geoecology, Saint Petersburg Mining University (2, 21 liniya V.O., St. Petersburg, Russia, 199106).

Malygin, Nikita Alexeevich, Occupational safety specialist, LLC “Elcom” (34, building 3, Vitebsk Sortirovochnaya St., St. Petersburg, Russia, 192102).

© Chukaeva M. A., Petrov D. S., Malygin N. A., 2025