ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Экспериментальное моделирование системы болотных биогеоценозов для повышения эффективности очистки карьерных вод

М.А.ПАШКЕВИЧ, А.Э.КОРОТАЕВА✉, В.А.МАТВЕЕВА

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Пашкевич М.А., Коротаева А.Э., Матвеева В.А. Экспериментальное моделирование системы болотных биогеоценозов для повышения эффективности очистки карьерных вод // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 785-794. EDN QJYDIH

Аннотация. Деятельность предприятий горнопромышленного сектора приводит к образованию большого количества сточных вод, загрязненных соединениями азотной группы и металлами. При недостаточной очистке данные поллютанты попадают в окружающую среду и оказывают токсическое действие на живые организмы. В настоящее время сконструированные водно-болотные угодья получили широкое распространение в качестве систем очистки сточных вод ввиду сочетания в себе физических, химических и биологических процессов удаления загрязняющих веществ. В данном исследовании была смоделирована экспериментальная система для повышения эффективности очистки карьерных сточных вод горнопромышленного предприятия за счет совместного использования высшей водной растительности: рогоза широколистного (*Typha latifolia* L.), частухи обыкновенной (*Alisma plantago-aquatica* L.), ситника членистого (*Juncus articulatus* L.) и низшей водной растительности (*Chlorella* sp.). Проанализированы концентрации соединений азотной группы и металлов как в модельном, так и в очищенном растворе карьерных сточных вод для расчета эффективности очистки. Анализировались концентрации поллютантов в тканях высшей водной растительности для оценки аккумуляционной способности и эффективности транслокации загрязняющих веществ. Результаты экспериментального исследования показали практическую применимость сконструированной системы комплексной очистки для снижения концентрации загрязняющих веществ в карьерных сточных водах, а также увеличение эффективности очистки за счет внедрения низшей водной растительности в систему.

***Ключевые слова*:** сточные воды; растительность; прибрежно-водная растительность; азотные соединения; микроводоросль; комплексная очистка; биоремедиация; фиторемедиация

Поступила: 20.03.2023 ***Принята: 20.09.2023*** ***Онлайн: 11.10.2023*** ***Опубликована: 27.10.2023***

Введение. Карьерные сточные воды, образующиеся в результате деятельности горнопромышленных предприятий, характеризуются многокомпонентным составом [1, 2]. Биогенные соединения и тяжелые металлы, являясь одними из основных загрязняющих веществ в сточных водах и попадая в поверхностные и подземные водотоки, становятся причиной существенных нарушений в естественных процессах экосистем [3, 4]. Вследствие эффекта биомагнификации тяжелые металлы накапливаются в пищевой цепочке и, в конечном счете, попадают в организм человека и живых организмов, вызывая нарушения работы жизненно важных систем [5, 6]. Поступление биогенных элементов приводит к возникновению процесса эвтрофикации [7], что ведет к снижению растворенного кислорода и освещенности в природных водоемах [8].

Сконструированные водно-болотные угодья становятся экономичной альтернативой традиционным методам очистки сточных вод. Они представляют собой системы, в которых осуществляется поглощение поллютантов в результате протекания естественных экосистемных процессов, в том числе жизнедеятельности прибрежно-водной растительности, микроорганизмов и бактерий [9]. В настоящее время сконструированные водно-болотные угодья используются для очистки сточных вод, образующихся в результате деятельности сельского хозяйства [7, 10], животноводства [11], а также предприятий горной [12], нефтегазовой [13, 14] и металлургической отрасли [15].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Укрупненно выделяют четыре типа сконструированных водно-болотных угодий: с открытой водной поверхностью, с горизонтальным и вертикальным подповерхностным током, гибридные системы [16]. В зависимости от кислородной обстановки, образующейся в результате режима подачи сточных вод в систему [17], происходит эффективное удаление многих поллютантов: соединений азота (NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-) [18, 19], фосфора ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}, PO_4^{3-}) [20, 21], гидролизуемых металлов (Al, Fe, Mn) [8, 22] и других металлов и металлоидов, являющихся неотъемлемой частью руды, а также вмещающей и пустой пород (Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Zn, As и т.д.) [23-25].

Все компоненты системы сконструированных водно-болотных угодий принимают участие в очистке сточных вод. Наблюдается растущий интерес к технологии снижения концентрации поллютантов за счет растительности и ассоциированных с ней микроорганизмов, получившей название «фиторемедиация» [22]. В зависимости от механизма поступления загрязняющего вещества в ткани растительности фиторемедиация подразделяется на несколько составляющих [26]. Так, при очистке сточных вод, загрязненных тяжелыми металлами, большую роль играет ризофильтрация, т.е. поглощение поллютантов корневой системой, а в результате процесса фитоэкстракции происходит поступление и накопление загрязняющих веществ в тканях растительности.

Целью проводимого исследования была оценка применимости системы сконструированных водно-болотных угодий для очистки карьерных сточных вод горнопромышленного предприятия. В исследовании анализировалась эффективность снижения концентрации загрязняющих веществ в модельном растворе карьерных сточных вод комплексной системой, состоящей из высшей водной растительности рогоза широколистного (*Typha latifolia* L.), частухи обыкновенной (*Alisma plantago-aquatica* L.), ситника членистого (*Juncus articulatus* L.) и низшей водной растительности (вид микроводоросли *Chlorella*). В рамках экспериментального исследования производился отбор проб модельного раствора и растительности для последующего анализа концентрации соединений азотной группы и металлов.

Методы. Исследование проводилось на основе данных угледобывающего предприятия, расположенного на территории Республики Хакасия, являющейся одним из старейших горнорудных районов Сибири (рис.1). Климат района резко континентальный и характеризуется морозной зимой и теплым летом. Диапазон температур летом от 9,8 до 25,2 °С со средней месячной температурой 16,8 °С.

Отработка каменноугольного месторождения осуществляется открытым способом. В качестве взрывчатых веществ при буровзрывных работах используются смеси на основе аммиачной селитры. Образование карьерных сточных вод происходит в результате разгрузки подземных водоносных горизонтов и попадания атмосферных осадков в карьерную выемку. По гидрологическим признакам на площади карьерного поля выделено четыре водоносных горизонта, воды которых относятся к гидрокарбонатному, сульфатно-гидрокарбонатному, хлоридно-гидрокарбонатному или сульфатно-хлоридному типу.

К настоящему моменту объем карьерного водопритока составляет порядка 15 000 м^3/сут, при этом доля подземных вод около 70 %. Для отвода образующихся вод из зумфа карьера применяются насосы, перекачивающие карьерные сточные воды в пруд-накопитель. В зимние месяцы водоприток снижается, происходит накопление сточных вод, а их очистка из-за малого объема не осуществляется.



Рис.1. Район расположения предприятия

На основе материалов, полученных от исследуемого угледобывающего предприятия, были определены качественный и количественный составы модельного раствора карьерных сточных вод. Для приготовления модельного раствора использовались соли: нитрат натрия, нитрит натрия, хлорид кальция, железо сернокислое (II) 7-водное, сульфат калия, магний хлористый 6-водный, гидрокарбонат натрия, хлорид натрия и калий фосфорнокислый 1-замещенный. Кроме того, был использован водный раствор основных микрокомпонентов, необходимых для жизне-

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 785-794
© М.А.Пашкевич, А.Э.Коротаева, В.А.Матвеева, 2023

деятельности растений, а именно Mn, B, Mo, Cu, Zn, Co, концентрации которых принимались равными концентрациям в карьерной сточной воде предприятия. Отбор аликвот приготовленных растворов солей осуществлялся исходя из общего объема исходного модельного раствора, поступающего в экспериментальную установку на очистку за один цикл очистки. В табл.1 представлен состав модельного раствора.

Таблица 1

Качественный и количественный составы модельного раствора

Загрязняющее вещество (ЗВ)	Концентрация ЗВ в растворе, мг/дм^3	ПДК*, мг/дм^3
Нитрат-ион	100	45
Нитрит-ион	6,0	3,0
Железо	0,04	0,3
Кальций	76,8	–
Натрий + Калий	404	–
Гидрокарбонат-ион	656,8	–
Фосфат-ион	0,16	3,5
Марганец	0,011	0,1
Бор	0,004	0,5
Молибден	0,001	0,07
Медь	0,01	1,0
Цинк	0,001	5,0
Кобальт	0,0004	0,1
pH	7-8	–

* СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Экспериментальная установка была смоделирована по примеру системы сконструированных водно-болотных угодий открытого типа (рис.2). Выбор данной системы обосновывался наименьшими капитальными и эксплуатационными затратами на внедрение в существующую систему очистки, а именно на эксплуатирующийся пруд-накопитель предприятия. В состав установки входили водно-болотная растительность (4), загрузка для ее укоренения (6), микроорганизмы и стеклянный резервуар (5), в объеме которого происходила очистка. Экспериментальная установка была снабжена лампой полного спектра (3) для имитации 10-часового светового дня. Пластиковый контейнер объемом 60 л (1) предшествовал экспериментальной установке в качестве распределительного резервуара модельного раствора карьерных сточных вод. Металлический контейнер объемом 65 л (8) использовался как приемный резервуар очищенного модельного раствора. Для достижения более высокой эффективности очистки в резервуар экспериментальной установки в качестве доминантного вида микроорганизма был внесен вид микроводоросли *Chlorella* (7). Суспензия клеток с оптической плотностью 0,275 была добавлена в количестве 5 % от общего объема установки (5).

В качестве водно-болотной растительности в экспериментальной установке использовались рогоз широколистный (*Typha latifolia* L.), частуха обыкновенная (*Alisma plantago-aquatica* L.) и ситник членистый (*Juncus articulatus* L.), которые характеризуются высокой степенью аккумуляции загрязняющих веществ из сточных вод [27-29]. Данные виды растений отбирались в естественных

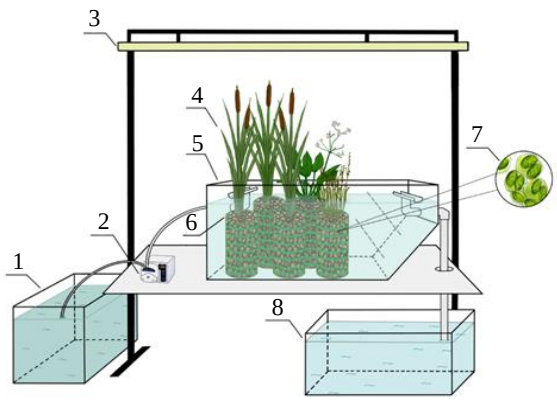


Рис.2. Схема экспериментальной установки

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

условиях произрастания и акклиматизировались в течение двух недель на территории проведения эксперимента. Акклиматизированные экземпляры растительности разделялись на две идентичные группы, одна из которых не участвовала в экспериментальном исследовании, вследствие чего концентрации поллютантов в тканях растительности принимались за фоновые. Вторая группа растительности помещалась в экспериментальную установку в процентном соотношении видов 60:20:20 в сконструированных емкостях из пластиковой сетки диаметром 15 см и высотой 25 см. В качестве загрузки использовалась смесь щебня и керамзита фракцией 5-20 и 10-20 мм соответственно.

Соотношение видов определялось в зависимости от характеристик рассматриваемой растительности, а также вмещающей способности экспериментальной установки. Предпочтение отдавалось рогозу широколистному, как основному виду в системе очистки, в связи с его более высоким фиторемедиационным потенциалом. Представители видов частуха обыкновенная и ситник членистый помещались в экспериментальную установку в качестве вспомогательных видов для интенсификации процесса очистки, а также увеличения поверхности закрепления доминантного вида микроорганизма за счет развитой высокой удельной площади поверхности корневой системы.

Модельный раствор из контейнера (1) непрерывно подавался в экспериментальную установку при помощи перистальтического насоса (2). Скорость дозирования раствора составляла 8,6 мл/мин и рассчитывалась из значения среднего гидравлического времени пребывания сточных вод в сооружении очистки на предприятии, равного 3-4 дням. Экспериментальное исследование проводилось на базе Научного центра «Экосистема» Санкт-Петербургского горного университета при температуре 23 ± 0,5 °С и относительной влажности 84 ± 2 %.

Пробы модельного раствора карьерных сточных вод отбирались на трех точках: на входе и выходе экспериментальной установки системы водно-болотных угодий, а также непосредственно из объема очищаемых вод, находящихся в установке. В общей сложности было произведено шесть последовательных циклов очистки модельного раствора в течение 26 дней. Каждая проба помещалась в стерильную пластиковую пробирку объемом 50 мл, маркировалась и охлаждалась до 4 °С до проведения анализа.

Для контроля кислотности модельного раствора определялись значения pH при помощи иономера Эксперт-001-3. Производились измерения нитратного и нитритного азота методом жидкостной хроматографии на приборе LC-20 Shimadzu. Концентрация металлов в растворе определялась при помощи атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой ICPE-9000 (Shimadzu).

Для оценки концентрации загрязняющих веществ в тканях растительности в конце экспериментального исследования производился отбор экземпляров растений каждого вида, суммарная биомасса которых обеспечивала достоверность результатов проводимых анализов. Отобранные экземпляры растительности подвергались основным этапам подготовки: разделялись на основные вегетативные органы – листья и корни, высушивались до воздушно-сухого состояния и измельчались при помощи лабораторного блендера Waring LB20EG.

Для определения концентрации нитратного азота 1 г каждой предварительно подготовленной растительной пробы помещался в колбу, куда добавлялось 50 мл 1 %-ного раствора алюмокалиевых квасцов. Далее полученные растворы перемешивались на магнитной мешалке в течение 3 мин, после чего фильтровались с получением прозрачного фильтрата, используемого при проведении измерений. Концентрация нитратного азота определялась ионометрическим методом при помощи иономера Эксперт-001-3. Полученные значения массовой концентрации нитратного азота в водной вытяжке пересчитывались в миллиграммах на килограмм сухой массы.

Анализ концентрации тяжелых металлов в тканях растительности проводился в несколько этапов. Производилось озоление предварительно подготовленных растительных проб в муфельной печи Nabertherm LT 15/11 при 550 °С в течение 10 ч. Извлечение металлов из золы в раствор осуществлялось методом кислотной экстракции с добавлением 33 % HNO_3. Концентрация металлов в растворе определялась при помощи атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой ICPE-9000 (Shimadzu).

Полученные значения массовой концентрации металлов в растворе пересчитывались на сухую массу. Для этого дополнительно определялись значения зольности: 1 г каждой предвари-

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 785-794
© М.А.Пашкевич, А.Э.Коротаева, В.А.Матвеева, 2023

тельно подготовленной растительной пробы помещался в тигель и далее в муфельную печь Nabertherm LT 15/11, где пробы выдерживались при 550 °С до исчезновения видимых следов углеродных соединений. Расчет зольности проводился согласно ГОСТ Р 56881-2016.

Для оценки влияния металлов и вида растений на значения концентрации аккумулированных металлов в тканях растительности проводился двухфакторный анализ ANOVA. Уровень значимости при подсчете принимался равным 0,05. Для оценки транспорта загрязняющих веществ в тканях растительности рассчитывался коэффициент линейной корреляции Пирсона. Статистическая обработка результатов экспериментального исследования выполнялась при помощи программного продукта MS Excel.

Обсуждение результатов. Внедрение микроводоросли вида *Chlorella* в систему очистки сточных вод обуславливается рядом преимуществ. В процессе роста микроводоросль может поглощать из сточных вод загрязняющие вещества, преимущественно азот и фосфор [30, 31]. Жизнеспособность микроводоросли обусловлена тем, что модельный раствор карьерных сточных вод содержит биогенные соединения, а также тяжелые металлы, являющиеся эссенциальными макро- и микрокомпонентами, что делает его максимально приближенным к составу питательной среды, необходимой для роста микроводоросли. Кроме того, микроводоросль вида *Chlorella* обладает высокой фотосинтетической активностью и скоростью роста биомассы [32]. Скорость выработки кислорода равна 2-10 $O_2/м^2 \cdot ч$ и зависит от освещенности окружающей среды, достигая максимальных значений в полуденное время [33-35].

В экспериментальной установке на протяжении исследования установилась аэробная среда в связи с фотосинтетическим выделением кислорода растительностью и микроводорослями. Во многих сконструированных водно-болотных угодьях в ночное время расходуется меньше кислорода, произведенного днем [30], что повышает концентрацию растворенного кислорода в воде. В сложившейся обстановке происходило окисление нитритного азота в процессе нитрификации [19] и к концу 4-го цикла очистки – устойчивое снижение концентрации в модельном растворе на 99 %. Ввиду того, что нитритный азот переходил в нитратную форму, значительного изменения концентрации нитратного азота на выходе из установки не наблюдалось.

При сравнении значений эффективности очистки нитритного азота в модельном растворе карьерных сточных вод и в шахтных водах сходного состава исключительно при помощи высшей водной растительности [12] наблюдалось увеличение эффективности удаления на 18 % в текущем исследовании. Это показывает, что внедрение микроводоросли вида *Chlorella* в систему очистки способствовало интенсификации процесса поглощения загрязняющего вещества из карьерных сточных вод.

Как известно, нитратная и аммонийная формы азота, попадая в растительную клетку, подвергаются поэтапному превращению в рамках азотного обмена. Поглощенный аммонийный азот напрямую включается в синтез аминокислот и амидов. В это же время нитратный азот первоначально восстанавливается до нитритной формы в цитозоле клетки и далее в хлоропласте – до аммонийной, который также поступает на синтез аминокислот и амидов. Избыточное количество нитратного азота, не используемое для биосинтеза, запасается в вакуоле клетки [36]. Поэтому для количественной оценки накопленного азота в тканях растительности в ходе экспериментального исследования была проанализирована концентрация нитратного азота (рис.3).

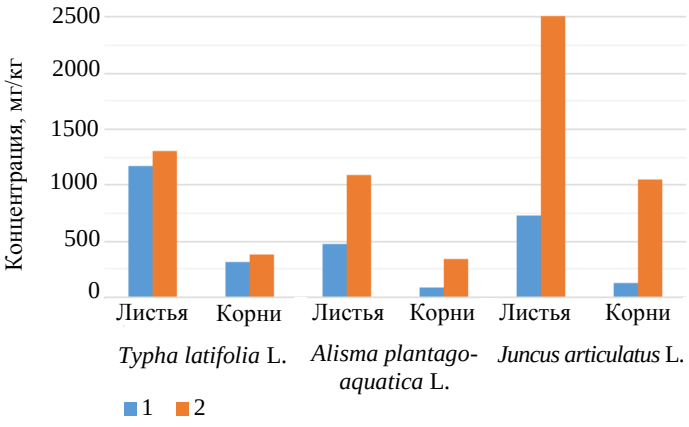


Рис.3. Концентрация нитратного азота в различных тканях растений
1 – фоновые значения; 2 – экспериментальные

Как видно, интенсивность аккумуляции азота в различных видах растений отличается, что обусловлено физиологией и морфологией каждого вида. Однако для представителей исследуемых видов растений наблюдалась тенденция большего накопления нитратного азота в листьях по сравнению с корнями. В листьях рогоза широколистного, частухи обыкновенной и

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

ситника членистого концентрация нитратного азота в конце эксперимента в 3,4, 3,2 и 2,4 раза превосходила концентрацию в корнях. Наибольшими значениями аккумулированного поллютанта в листьях и корнях характеризуется ситник членистый – 2514,2 и 1056,1 мг/кг соответственно.

Во всех тканях исследуемой растительности к концу экспериментального исследования отмечено значительное возрастание концентрации нитратного азота по сравнению с фоновыми значениями. Наибольшее возрастание концентрации нитратного азота в листьях по сравнению с фоновыми значениями отмечено у ситника членистого (в 3,4 раза), далее у частухи обыкновенной (в 2,3 раза) и рогоза широколистного (в 1,1 раза). Накопление нитратного азота в корнях растительности характеризуется аналогичной последовательностью видов и увеличивается по отношению к фоновым значениям в 8,3, 3,7 и в 1,2 раза соответственно.

Полученные данные позволяют говорить о эффективной аккумуляции нитратного азота в тканях исследуемой растительности и как следствие поглощении азотных соединений из водного раствора. Стоит отметить, что на эффективность поглощения данных соединений растительностью оказывает влияние соотношение N/P в водной среде. Концентрация фосфора в модельном растворе карьерных сточных вод (0,05 мг/дм^3) в несколько десятков раз ниже концентрации азотных соединений. Тем не менее полученные значения концентрации аккумулированного нитратного азота в тканях растительности говорят о возможности удаления азотных соединений при низком уровне фосфора, что согласуется с данными, полученными в работе [29].

В связи с установившейся аэробной средой в экспериментальной установке происходило эффективное удаление гидролизуемых металлов из модельного раствора. Средняя концентрация Mn на протяжении экспериментального исследования в растворе на входе в установку составляла 0,011 мг/дм^3, на выходе – 0,0016 мг/дм^3. Происходило снижение концентрации Mn в среднем с эффективностью от 85,5 %, начиная с первого цикла очистки. Удаление железа характеризовалось меньшей эффективностью и равнялось 12,9 %.

Аккумуляция металлов в растительности, как и нитратного азота, обуславливается ее физиологией и морфологией. Результаты исследования демонстрируют высокие значения концентрации аккумулированных металлов в листьях рогоза широколистного (рис.4).

По сравнению с фоновыми концентрациями Mo, Zn, Cu, Mn и Fe произошло значительное увеличение их концентрации, а именно в 1,7; 2,7; 3,3; 1,9 и 2,5 раза соответственно. Наибольшая аккумуляционная способность была выявлена по отношению к железу (1889 мг/кг) и марганцу (1211 мг/кг). Наблюдается следующий ряд накопления металлов: Fe > Mn > Zn > Cu > Mo, что согласуется с данными, полученными в предыдущих исследованиях при изучении аккумуляционной способности данного вида [37]. Значительного прироста концентрации металлов в тканях других исследуемых видах растений в рамках проводимого исследования не наблюдалось, однако во всех тканях растительности идентичный ряд накопления.

Следует отметить, что способность растительности усваивать металлы зависит от ее вида и металла [12]. Некоторые виды растений, являясь гипераккумуляторами, хорошо переносят превышение концентраций поллютантов в водных системах и, как следствие, их высокое содержание в своей биомассе [23, 38]. В проведенном исследовании была обнаружена положительная связь между концентрацией поллютантов в тканях растительности и металлами ($p < 0{,}007$). При этом доля влияния этого фактора составила 43,3 %, что является достаточной величиной при учете всех факторов, влияющих на поглощение металлов растительностью, характеристик окружающей среды (pH среды, освещенность, температура, соленость и т.д.), и вида растений (в данном исследовании доля фактора – 11,4 %) [39].

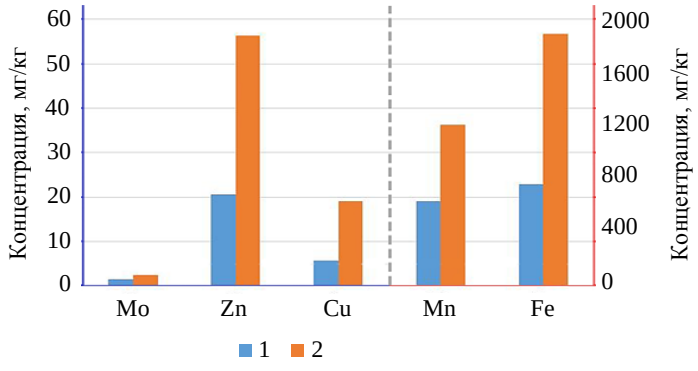


Рис.4. Концентрация металлов в листьях рогоза широколистного (*Typha latifolia* L.) (значения столбцов слева от пунктирной линии относятся к синей вертикальной оси, справа – к красной)

1 – фоновые значения; 2 – экспериментальные

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 785-794
© М.А.Пашкевич, А.Э.Коротаева, В.А.Матвеева, 2023

После поглощения корнями растительности металлы могут накапливаться непосредственно в корнях и (или) транспортироваться в надземные органы. Для оценки эффективности транспорта поллютантов в исследуемой растительности был проведен корреляционный анализ Пирсона между концентрациями металлов в надземных и подземных органах. Равномерный транспорт поглощенных металлов к надземным органам осуществляется через сосуды ксилемы в виде хелатных комплексов, иммобилизированных во внутриклеточных пространствах корня [40], что косвенно подтверждается полученной прямо пропорциональной зависимостью (r = 0,88, 0,99, 0,99 для рогоза широколистного, частухи обыкновенной и ситника членистого соответственно).

На эффективный перенос металлов от подземных к надземным органам указывает соотношение концентрации металлов в побегах к корням больше единицы [41]. В условиях экспериментального исследования такое значение показали рогоз широколистный к Zn, Cu и Mn, а также частуха обыкновенная к Zn и Cu (табл.2).

Таблица 2

Концентрация металлов в тканях растительности в конце экспериментального исследования

Вид растений	Концентрация, мг/кг				Кратность			
	Zn	Cu	Mn	Fe	Zn	Cu	Mn	Fe
Рогоз широколистный								
Листья	56,3	19,0	1211,1	1889	3,5	2,6	18,7	0,8
Корни	15,9	7,2	64,6	2436				
Частуха обыкновенная								
Листья	18,3	8,4	123,6	567	1,5	1,1	0,9	0,2
Корни	11,9	7,7	131,4	2300				
Ситник членистый								
Листья	19,0	9,9	73,2	1046	0,5	0,2	0,3	0,1
Корни	39,9	47,7	229,9	9105				

Все три вида растений, используемые в экспериментальном исследовании, характеризуются развитой корневой системой с большой площадью поверхности, что оказывает положительное влияние на скорость поглощения поллютантов из раствора [29]. Для наглядности представления полученных результатов развитие корневой системы растительности приведено на примере рогоза широколистного (рис.5).

В начале проведения экспериментального исследования наблюдалось угнетение корневой системы высаженной растительности, что выражалось в изменении окраски и нарушении роста

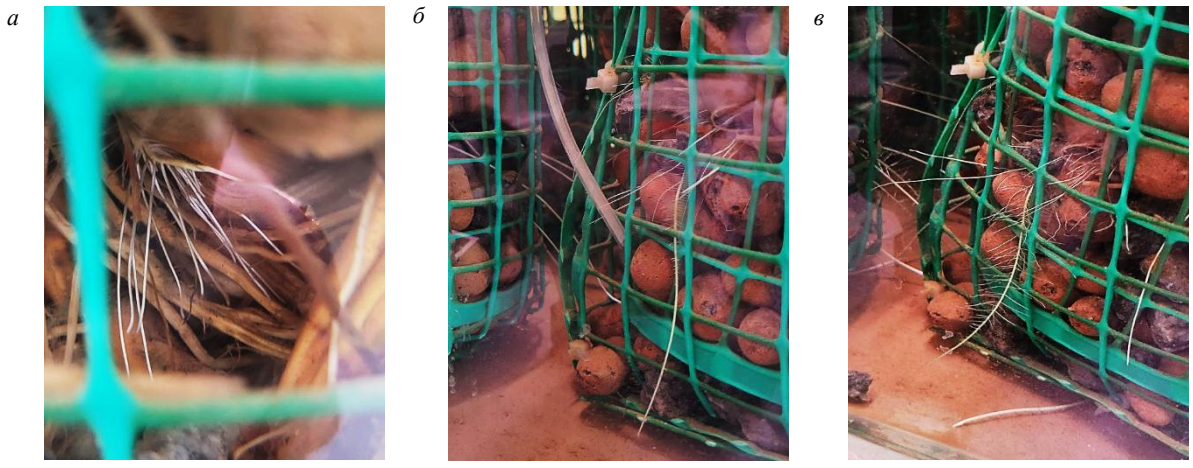


Рис.5. Развитие корневой системы рогоза широколистного (*Typha latifolia* L.)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

корней. В конце периода адаптации растительности к условиям экспериментальной установки, после двух недель с начала проведения экспериментального исследования, был выявлен незначительный рост молодых корешков у каждого вида (рис.5, *а*). В течение периода начального поглощения поллютантов отмечалось их увеличение в размерах и рост новых корней (рис.5, *б*). Уже в начале периода устойчивого поглощения отмечено активное ветвление образовавшихся корней (рис.5, *в*).

Корневая система при высаживании помещалась на расстояние 10 см от дна сконструированных емкостей из пластиковой сетки. К концу экспериментального исследования наблюдался рост корней через загрузку до дна конструкции. Произошло увеличение площади корневой системы в среднем на 85 % от первоначально посаженной, что позволяет говорить о практически полном ее восстановлении и как следствие успешной адаптации растительности к концентрациям загрязняющих веществ в модельном растворе. У всех исследуемых видов растений во время экспериментального исследования отмечался рост как подземной, так и надземной части.

Заключение. В результате проведенного исследования была доказана практическая применимость комплексного метода биологической очистки по примеру системы сконструированных водно-болотных угодий открытого типа для условий угледобывающего предприятия. На основании полученных данных можно сделать вывод, что рассматриваемая система очистки может быть применена на предприятиях горнодобывающей промышленности со сходным химическим составом образующихся сточных вод.

Помимо способности к самоочищению данной системы за счет протекания естественных процессов, эффективность удаления загрязняющих веществ повышается в результате совместного использования высшей и низшей водной растительности. Используемые виды растений успешно адаптировались к среде модельного раствора карьерных сточных вод, о чем свидетельствует развивающаяся корневая система и рост надземной части.

Условия, созданные при проведении экспериментального исследования, способствовали активному удалению нитритного азота и гидролизуемых металлов из модельного раствора. Для увеличения эффективности удаления нитратного азота из карьерных сточных вод рекомендуется создание анаэробных зон в системе сконструированных водно-болотных угодий для интенсификации процесса денитрификации.

Все виды растений (рогоз широколистный, частуха обыкновенная и ситник членистый) продемонстрировали способность накапливать нитратный азот в своих тканях, при этом преобладающая концентрация отмечена в надземной части. Наибольшее накопление наблюдалось в листьях и корнях ситника членистого – 2514,2 и 1056,1 мг/кг соответственно.

По отношению к металлам (Mo, Zn, Cu, Mn и Fe) наибольшую аккумуляционную способность показал рогоз широколистный. Происходило активное накопление металлов в листьях растительности, преимущественно Fe и Mn. Кроме того, у рогоза широколистного и частухи обыкновенной был выявлен активный транспорт Zn, Cu, Mn и Zn и Cu, что является одним из признаков, характеризующим растения-гипераккумуляторы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Chukaeva M.A., Povarov V.G., Sverchkov I.P.* Iron-Containing Metalworking Wastes as a Chemosorbent for Wastewater Treatment from Molybdenum Ions // Moscow University Chemistry Bulletin. 2020. Vol. 75. Iss.1. P. 36-42. DOI: 10.3103/S0027131420010058

2. *Летуев К.В., Ковшов С.В., Гридина Е.Б.* Технология гидрообеспыливания автомобильных дорог угольных разрезов с применением очищенных сточных и дренажных вод // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 1. С. 30-33. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-1-30-33

3. *Литвинова Т.Е., Сучков Д.В.* Комплексный подход к утилизации техногенных отходов минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-1. С. 331-348. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_331

4. *Chukaeva M.A., Petrov D.S.* Assessment and analysis of metal bioaccumulation in freshwater gastropods of urban river habitats, Saint Petersburg (Russia) // Environmental Science and Pollution Research. 2023. Vol. 30. Iss. 3. P. 7162-7172. DOI: 10.1007/s11356-022-21955-8

5. *Алексеенко В.А., Швыдкая Н.В., Бек Дж. и др.* Аккумуляция химических элементов почвенно-растительным покровом Северо-Кавказской геохимической провинции // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 141-153. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.15

6. *Sergeev V.V., Cheremisina O.V., Fedorov A.T. et al.* Interaction features of sodium oleate and oxyethylated phosphoric acid esters with the apatite surface // ACS Omega. 2022. Vol. 7. № 3. P. 3016-3023. DOI:10.1021/acsomega.1c06047

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

7. *Nizam N.U.M., Hanafiah M.M., Noor I.M., Karim H.I.A.* Efficiency of Five Selected Aquatic Plants in Phytoremediation of Aquaculture Wastewater // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. Iss. 8. № 2712. DOI: 10.3390/APP10082712

8. *Dhir B.* Phytoremediation: Role of Aquatic Plants in Environmental Clean-Up. India: Springer India, 2013. 111 p. DOI: 10.1007/978-81-322-1307-9

9. *Choudhury M.I., Segersten J., Hellman M. et al.* Importance of plant species for nitrogen removal using constructed floating wetlands in a cold climate // Ecological Engineering. 2019. Vol. 138. P. 126-132. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.07.012

10. *Kosolapova S.M., Smal M.S., Rudko V.A. et al.* A new approach for synthesizing fatty acid esters from linoleic-type vegetable oil // Processes. 2023. Vol. 11. № 5. № 1534. DOI: 10.3390/pr11051534

11. *Wu S., Kuschk P., Brix H. et al.* Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review // Water Research. 2014. Vol. 57. P. 40-55. DOI: 10.1016/j.watres.2014.03.020

12. *Etteieb S., Zolfaghari M., Magdouli S. et al.* Performance of constructed wetland for selenium, nutrient and heavy metals removal from mine effluents // Chemosphere. 2021. Vol. 281. № 130921. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130921

13. *Shammazov I.A., Batyrov A.M., Sidorkin D.I., Van Nguyen T.* Study of the Effect of Cutting Frozen Soils on the Supports of Above-Ground Trunk Pipelines // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. № 3139. DOI: 10.3390/app13053139

14. *Pavlinery N., Skoulikidis N.Th., Tsihrintzis V.A.* Constructed Floating Wetlands: A review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis // Chemical Engineering Journal. 2017. Vol. 308. P. 1120-1132. DOI: 10.1016/j.cej.2016.09.140

15. *Kataki S., Chatterjee S., Vairale M.G. et al.* Constructed wetland, an eco-technology for wastewater treatment: A review on types of wastewater treated and components of the technology (macrophyte, biolfilm and substrate) // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 283. № 111986. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.111986

16. *Rozema E.R., VanderZaag A.C., Wood J.D. et al.* Constructed Wetlands for Agricultural Wastewater Treatment in Northeastern North America: A Review // Water. 2016. Vol. 8. № 173. DOI: 10.3390/w8050173

17. *Vymazal J., Březinová T.* Accumulation of heavy metals in aboveground biomass of *Phragmites australis* in horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment: A review // Chemical Engineering Journal. 2016. Vol. 290. P. 232-242. DOI: 10.1016/j.cej.2015.12.108

18. *Zhang Lingling, Sun Zhenzhong, Xie Jia et al.* Nutrient removal, biomass accumulation and nitrogen-transformation functional gene response to different nitrogen forms in enhanced floating treatment wetlands // Ecological Engineering. 2018. Vol. 112. P. 21-25. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.12.021

19. *Fernandez-Fernandez M.I., de la Vega P.T.M., Jaramillo-Morán M.A., Garrido M.* Hybrid Constructed Wetland to Improve Organic Matter and Nutrient Removal // Water. 2020. Vol. 12. № 2023. DOI: 10.3390/w12072023

20. *White S.A.* Plant Nutrient Uptake in Full-Scale Floating Treatment Wetlands in a Florida Stormwater Pond: 2016-2020 // Water. 2021. Vol. 13. № 569. DOI: 10.3390/w13040569

21. *Sandoval L., Zamora-Castro S.A., Vidal-Álvarez M., Marín-Muñiz J.L.* Role of Wetland Plants and Use of Ornamental Flowering Plants in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A review // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. № 685. DOI: 10.3390/app9040685

22. *Sabreena, Hassan S., Bhat S.A. et al.* Phytoremediation of Heavy Metals: An Indispensable Contrivance in Green Remediation Technology // Plants. 2022. Vol. 11. № 1255. DOI: 10.3390/plants11091255

23. *Chamba-Eras I., Griffith D.M., Kalinhoff C. et al.* Native Hyperaccumulator Plants with Differential Phytoremediation Potential in an Artisanal Gold Mine of the Ecuadorian Amazon // Plants. 2022. Vol. 11. № 1186. DOI: 10.3390/plants11091186

24. *Голик В.И., Маринин М.А.* Практика подземного выщелачивания урана в блоках // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-1. С. 5-20. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_5

25. *Zubkova O., Alexeev A., Polyanskiy A. et al.* Complex Processing of Saponite Waste from a Diamond-Mining Enterprise // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. № 6615. DOI: 10.3390/app11146615

26. *Sladkovska T., Wolski K., Bujak H. et al.* A Review of Research on the Use of Selected Grass Species in Removal of Heavy Metals // Agronomy. 2022. Vol. 12. № 2587. DOI: 10.3390/agronomy12102587

27. *Khan S., Ahmad I., Shah M.T. et al.* Use of constructed wetland for the removal of heavy metals from industrial wastewater // Journal of Environmental Management. 2009. Vol. 90. P. 3451-3457. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.05.026

28. *Kataki S., Chatterjee S., Vairale M.G. et al.* Constructed wetland, an eco-technology for wastewater treatment: A review on types of wastewater treated and components of the technology (macrophyte, biolfilm and substrate) // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 283. № 111986. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.111986

29. *Wang Kunlun, Hu Qian, Wei Yumin et al.* Uptake Kinetics of NH_4^+, NO_3^- and $H2PO_4^-$ by *Typha orientalis*, *Acorus calamus* L., *Lythrum salicaria* L., *Sagittaria trifolia* L. and *Alisma plantago-aquatica* Linn // Sustainability. 2021. Vol. 13. P. 434. DOI: 10.3390/su13010434

30. *Reddy K.R., DeLaune R.D., Inglett P.W.* Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2022. 734 p. DOI: 10.1201/9780429155833

31. *Gonçalves A.L., Pires J.C.M., Simões M.* A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment // Algal Research. 2017. Vol. 24. P. 403-415. DOI: 10.1016/j.algal.2016.11.008

32. *Randrianarison G., Ashraf M.A.* Microalgae Plant (*Chlorella sp.*) for Wastewater Treatment and Energy Production // Ekoloji. 2018. Vol. 27. Iss.106. P. 1455-1465.

33. *Rearte T.A., Celis-Plá P.S.M., Neori A. et al.* Photosynthetic performance of *Chlorella vulgaris* R117 mass culture is moderated by diurnal oxygen gradients in an outdoor thin layer cascade // Algal Research. 2021. Vol. 54. № 102176. DOI: 10.1016/j.algal.2020.102176

34. *Doucha J., Straka F., Lívanský K.* Utilization of flue gas for cultivation of microalgae (*Chlorella sp.*) in an outdoor open thin-layer photobioreactor // Journal of Applied Phycology. 2005. Vol. 17. P. 403-412. DOI: 10.1007/s10811-005-8701-7

35. *Doucha J., Lívanský K.* Productivity, CO_2/O_2 exchange and hydraulics in outdoor open high density microalgal (*Chlorella sp.*) photobioreactors operated in a Middle and Southern European climate // Journal of Applied Phycology. 2006. Vol. 18. P. 811-826. DOI: 10.1007/s10811-006-9100-4

36. *Pearsall W.H.* Nitrogen Metabolism in Plants: Methods and Protocols. New York: Humana Press, 2020. 178 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-9790-9

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

37. *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 // Environmental Monitoring and Assessment. 2023. Vol. 195. № 122. DOI: 10.1007/s10661-022-10750-0

38. *Wan Shuming, Pang Jun, Li Yiwei et al.* Hydroponic Phytoremediation of Ni, Co, and Pb by *Iris Sibirica* L. // Sustainability. 2021. Vol. 13. № 9400. DOI: 10.3390/su13169400

39. *Olguín E.J., Sánchez-Galván G.* Phytofiltration of Heavy Metals: Assessment of the Key Factors Involved in the Design of a Sustainable Process // Comprehensive Biotechnology. 2011. Vol. 6. P. 207-213. DOI: 10.1016/B978-0-08-088504-9.00379-2

40. *Rezania S., Taib S.M., Md Din M.F. et al.* Comprehensive review on phytotechnology: Heavy metals removal by diverse aquatic plants species from wastewater // Journal of Hazardous Materials. 2016. Vol. 318. P. 587-599. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.07.053

41. *Yan An, Wang Yamin, Tan Swee Ngin et al.* Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land // Frontiers in Plant Science. 2020. Vol. 11. P. 1-15. DOI: 10.3389/fpls.2020.00359

Авторы: **М.А.Пашкевич,** *д-р техн. наук, заведующий кафедрой, https://orcid.org/0000-0001-7020-8219 (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)*, **А.Э.Коротаева,** *аспирант, s20005@stud.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0002-0211-6782 (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)*, **В.А.Матвеева,** *канд. техн. наук, директор научного центра, https://orcid.org/0000-0001-9893-380X (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия)*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0