



УДК 628.3

**А. П. САМОДОЛОВ^{1,2}, ассистент кафедры водопользования и экологии,
аспирант кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем**

БИОАККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ AMD СТОКОВ

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

Тел.: +7 (902) 602-29-66; e-mail: asamodolov@lan.spbgasu.ru

²ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)", Южно-Уральский государственный университет

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

эл. почта: samodolov@mail.ru

Ключевые слова: техногенные воды, техническая конопля, горно-обогатительное предприятие, фиторемедиация, биоаккумуляция, тяжелые металлы, AMD, поллютанты.

В статье описаны результаты исследований взаимодействия конопли технической и кислотного стока горнометаллургического предприятия. Проанализирована возможность использования конопли для очистки кислых стоков, определена эффективность извлечения растениями тяжелых металлов. Исследования показали, что коноплю можно эффективно использовать для очистки стоков от тяжелых металлов 1 и 2 класса опасности. Растения в агрессивной среде продолжили развитие и размножение, при этом извлекли значительную часть поллютантов из исходного стока.

Предприятия горной промышленности являются одним из главных секторов экономики множества стран мира, обеспечивающих большое количество рабочих мест и значительные финансовые потоки в бюджеты всех уровней.

В середине 50-60-х годов прошлого столетия в связи с послевоенным промышленным бумом и масштабными геологоразведочными работами на крупнейших месторождениях полезных ископаемых начали расти объемы добычи угля и металлов. Разработка массивов месторождений полезных ископаемых, таких как медь, золото, вольфрам и др., привела к значительному загрязнению подземных вод, заболачиванию рек и водоемов. В итоге некоторые крупные месторождения оказались непригодными для промышленной разработки, в результате чего начались изменения в экологии многих территорий, а старые рудники стали приносить дополнительный вред, так как в атмосферу и грунтовые воды стали попадать специфические пластовые поллютанты.

Наиболее распространенными загрязнителями рудничных вод, оказывающие максимально негативное влияние на окружающую среду, считаются хлористые соединения и свободная серная кислота, которой сопутствуют растворимые соли, главным образом сульфаты тяжелых металлов [1–5]. Негативные последствия добычи полезных ископаемых для поверхностных и подземных вод обусловлены водной эрозией почв с последующим отложением осадков, понижением уровня и оседанием грунтовых вод, нарушением гидрологического цикла и выпадением осадков. Одной из самых серьезных угроз для водных ресурсов в горнодобывающей промышленности экологи считают кислые стоки горных предприятий, в мировой практике именуемые кислотный шахтный дренаж

(*Acid mine drainage (AMD)*). *AMD* способны оказывать долгосрочное разрушительное воздействие на реки, ручьи, водную флору и фауну [6-13].

Повышенная кислотность далеко не основная проблемная особенность *AMD*, экологическая обеспокоенность по поводу управления отходами горнодобывающей промышленности возникла по мере того, как при изучении состава таких отходов, выяснилось, что зачастую они содержат высокие уровни солей тяжелых металлов (ртути, меди, цинка, кадмия и т.д.) [14]. Также эти отходы часто содержат относительно низкие уровни органических веществ [15, 16] и, как следствие, не поддерживают рост и выживание многих живых организмов, включая бактерии [17], и эти области часто остаются без растительности (рис. 1).



Рис. 1. Последствия воздействия *AMD* на тайгу [18]

К основным современным методам переработки техногенных сточных вод горно-обогатительных предприятий относят адсорбцию/абсорбцию, ионный обмен, электродиализ, флотацию, электрофлотацию, электрокоагуляцию, обратный осмос и фиторемедиацию. Фиторемедиация (фитоэкстракция) – это технология очистки почв, загрязненных тяжелыми металлами, с помощью растений. Этот метод заключается в выращивании в течение определенного периода времени на загрязненных почвах специально подобранных видов растений, способных извлекать из почвы тяжелые металлы корневой системой и накапливать их в надземной части, которая впоследствии утилизируется, а процесс может быть повторен до достижения необходимого эффекта [19]. Аккумуляцию растением тяжелых металлов называют биоаккумуляцией. Основные достоинства этого метода – относительно низкая стоимость и простота во внедрении и обслуживании.

В качестве растения биоаккумулятора тяжелых металлов для исследования возможности очистки *AMD* от поллютантов была выбрана конопля техническая (лат. *Cánnabis* – род однолетних лубоволокнистых растений семейства Коноплевые (*Cannabaceae*). Включает в себя один полиморфный вид – *Cannabis sativa* (Конопля посевная)) по причине ее неприхотливости и возможности выращивания практически на всей территории страны.

Таким образом, целью статьи является оценка эффективности биоаккумуляционного процесса с использованием технической конопли для очистки *AMD* от тяжелых металлов (на примере Al, As, Co, Fe, Cu, Pb и Zn).



Образцы семян технической конопли для исследования предоставлены специализированной компанией, имеющей необходимые разрешения, сертификаты и прочие разрешительные документы для культивации культуры в коммерческих целях. Растение помещали в цилиндр объемом 600 мл и заливали 400 мл сточной воды, разбавленной в соотношении 1 к 10 дистиллированной водой.

Для оценки эффективности биоаккумуляционного процесса, изучения количественного изменения поллютантов в стоке, отбирали пробы стока по 50 мл., через каждые: 3, 6, 9, 24, 48, 72, 144 и 168 часов. Химический состав исходного стока и его изменения в зависимости от условий испытаний определяли на атомно-эмиссионном спектрометре *OPTIMA 2100DV* с индуктивно связанной плазмой.

Для изучения состава вегетативных органов технической конопли использовали метод микрорентгенофазового анализа на микроскопе *JEOL JSM-6460 LV*.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа исходного образца растения (в сыром весе) приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты микрорентгеноспектрального анализа исходного
образца конопли**

Среднее содержание элемента, %	C	O	Mg	Si	K	Ca	Fe	Cu
Исходный состав	43,4	41,9	1,3	1,1	4,6	5,8	0,1	0,3

Химический состав исходного стока представлен в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав исходного стока

Элемент	Al	As	Co	Cu	Fe	Pb	Zn
Содержание, мг/л	29,4	0,06	0,26	7,47	83,59	0,05	13,13

Как видно из таблицы, основными загрязнителями в исходной воде являются алюминий, мышьяк, кобальт, медь, железо, свинец и цинк. Эффективность биоаккумуляционного процесса оценивали по количественному изменению тяжелых металлов, входящих в состав исходного стока в статических условиях. Химический состав стока после взаимодействия в течении 168 часов с технической коноплей представлен в табл. 3.

Таблица 3

**Химический состав стока после взаимодействия
с технической коноплей**

Элемент	Al	As	Co	Cu	Fe	Pb	Zn
Содержание, мг/л	4,56	0,03	0,04	1,19	0,16	0	2,27



На рис. 2 приведены результаты исследования эффективности фиторемедиационного процесса в системе техническая конопля – AMD в статических условиях.

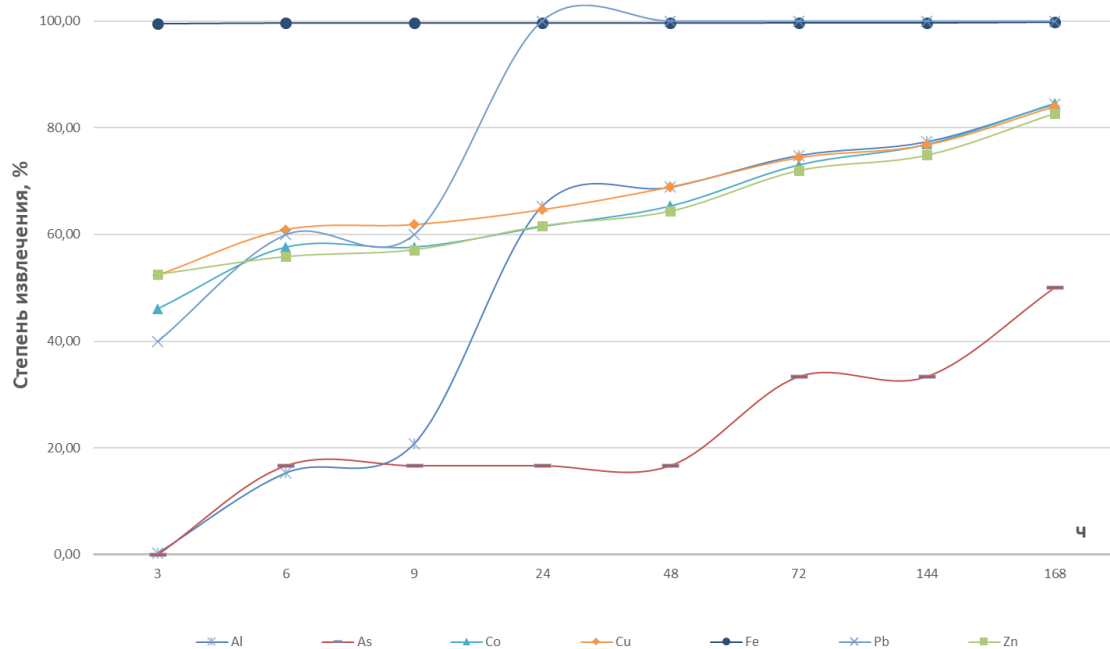


Рис. 2. Степень извлечения поллютантов из исходного при $t = 20^{\circ}\text{C}$ и различном времени контакта, % (материал автора)

Как видно из графиков, техническая конопля посредством биоаккумуляционного процесса позволяет снизить концентрацию поллютантов в среднем на 50–99%.

Худший результат оказался при очистке исходного стока от мышьяка.

По остальным поллютантам картина практически одинаковая, конопля извлекает тяжелые металлы из исходного стока с течением времени.

Необходимо отметить, что уровень pH в системе растение – сток от времени экспозиции незначительно увеличивается, с 3,04 до 3,24, что говорит о том, что конопля способна оказывать нейтрализующее действие на кислый сток.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа опытного образца технической конопли (в сыром весе), полученные после эксперимента, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты микрорентгеноспектрального анализа конопли после исследования

Среднее содержание элемента, %	C	O	Mg	Si	K	Ca	Fe	Cu
Состав после эксперимента	44,0	42,8	0,8	1,3	4,9	2,3	1,0	0,4

При проведении анализа выявлены отклонения в составе опытного образца конопли, значительно уменьшилось содержание кальция, увеличилось



содержание железа и меди, что может свидетельствовать о том, что конопля аккумулирует в своих тканях металлы из исходного стока.

По результатам проведенного исследования возможности применения конопли для очистки кислых подотвальных стоков рудников Северного Урала от тяжелых металлов была определена биоаккумуляционная способность конопли. Концентрация поллютантов сократилась в среднем на 50–99%. Отмечено накопление в тканях растения железа и меди.

Результаты исследований, представленные в данной статье, показывают, что техническая конопля позволяет эффективно удалить из подотвального стока значительную часть загрязнений тяжелыми металлами, включая наиболее опасные загрязнители, отнесенные к 1 и 2 классу, при одновременной нейтрализации стока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Олизаренко, В.В. Рудничный водоотлив при обработке медно–колчеданных месторождений Южного Урала / В. В. Олизаренко, М. М. Мингажев. – Магнитогорск : МГТУ, 2010. – 252 с. – ISBN 978-5-9967-0130-8. – Текст : непосредственный.
2. Шадрунова, И. В. Гидроминеральные медьсодержащие георесурсы Урала / И. В. Шадрунова, А. С. Самойлова, А. Ю. Глухова. – Магнитогорск : Минитип, 2006. – 156 с. – ISBN 5-8004-0059-8. – Текст : непосредственный.
3. Малышев, Ю. Н. Физико–химические процессы при добыче полезных ископаемых и их влияние на состояние окружающей среды / Ю. Н. Малышев, А. Т. Айруни, Е. Ю. Куликова. – Москва : Издательство Академии Горных Наук, 2002. – 270 с. – ISBN 5-7892-0092-3.
4. Абдрахманов, Р. Ф. Гидрогеоэкология Башкортостана / Р. Ф. Абдрахманов. – Уфа : Информреклама, 2005. – 344 с. – ISBN 5-94780-062-4. – Текст : непосредственный.
5. Абдрахманов, Р. Ф. Влияние техногенеза на поверхностные и подземные воды башкирского Зауралья и их охрана от загрязнения и истощения / Р. Ф. Абдрахманов, Р. М. Ахметов // Геологический сборник. – 2007. – № 6. – С. 266–269.
6. AY, Ugya. Water Pollution Resulting From Mining Activity : An Overview / A.Y. Ugya, Ajibade Fidelis, Ajibade Temitope, 2018.
7. Akabzaa, T. M. Impact of Mining Activities on Water in the Vicinity of the Obuasi Mine / Akabzaa T. M., Banoeng-Yakubo B. K, Seyire J. S. – 2005.
8. Bench, D. W. PCBs, Mining, and Water Pollution / D. W. Bench // Mine Design, Operations and Closure Conference, Polson, Montana, April 27-May 1, 2003. – Montana, 2003.
9. Evaluation of the Environmental Impact of Mining Industry Enterprises / A. V. Vorobyev, K. G. Karginov, S. A. Ananikyan, E. S. Odintsova // Ekologicheskaya ekspertiza (Environmental Expert Review). – № 3. – P 96-104.
10. Akcil, A.. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies / Akcil A., Koldas S. // Journal of Cleaner Production. – 2006. – № 14. – P. 1139-1145.
11. Skousen, Jeffrey (2018). Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies / Skousen Jeffrey, Ziemkiewicz Paul, McDonald Louis. // The Extractive Industries and Society. – 2018. – 6. 10.1016/j.exis.2018.09.008.
12. Akcil, A. Acid mine drainage (AMD): causes, treatment and case studies / Akcil A., Koldas K. J. // Cleaner Prod. – 2006. – 14:1139-1146. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2004.09.006.
13. Skousen, J. Overview of acid mine drainage treatment with chemicals / Skousen J. // Chapter 29. Acid Mine Drainage, Rock Drainage, and Acid Sulfate Soils : Causes, Assessment, Prediction, Prevention, and Remediation. – 2014. – DOI: 10.1002/9781118749197.ch29.



14. Asif, Z. Environmental management in North American mining sector / Asif Z, Z. Chen // Environmental Science and Pollution Research. – 2016. – 23(1). – P. 167-179.

15. Johnson MS, B. A. Prevention of heavy metal pollution from mine wastes by vegetative stabilization / Johnson MS, B. A. // Trans Inst Min Metall A. – 1977(86). – P. 47–55.

16. Krzaklewski, W. M. Pietrzykowski, Selected Physico-Chemical Properties of Zinc and Lead Ore Tailings and their Biological Stabilisation / W. M. Krzaklewski, // Water, Air, and Soil Pollution. – 2002. – 141(1). – P. 125-141.

17. Mendez, M. O. Phytostabilization Potential of Quailbush for Mine Tailings / Mendez, M. O., E. P. Glenn, R. M. Maier // Journal of Environmental Quality. – 2007. – № 36(1). – P. 245-253.

18. Ужас Шемур - экологическая катастрофа на Северном Урале. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=KTfydiIpGms> (дата обращения: 15.01.2025). – Текст : электронный.

19. Морозова, М. А. Фиторемедиация как метод очистки почв / М. А. Морозова // Науки о Земле. – 2018. – № 6(33). – С. 104-106.

SAMODOLOV Aleksandr Pavlovich^{1,2}, assistant of the chair of water management and ecology; postgraduate student of the chair of urban planning, engineering networks and systems

BIOACCUMULATION OF HEAVY METALS FROM AMD EFFLUENTS

¹Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
4, 2nd Krasnoarmeyskaya St., Saint Petersburg, 190005, Russia.

Tel.: +7 (902) 602-29-66; e-mail: asamodolov@lan.spbgasu.ru

²South Ural State University

76, Lenin Prospekt, Chelyabinsk, Chelyabinsk Region, 454080, Russia.

e-mail: samodolov@mail.ru

Key words: technogenic waters, technical hemp, mining and processing enterprise, phytoremediation, bioaccumulation, heavy metals, AMD, pollutants.

The article describes the results of research on the interaction of technical cannabis and acid runoff from a mining and metallurgical enterprise. The possibility of using cannabis to purify acidic wastewater has been analyzed, and the efficiency of extracting heavy metals by plants has been determined. Studies have shown that cannabis can be effectively used to purify wastewater from heavy metals of hazard class 1 and 2. Plants in an aggressive environment continued to develop and reproduce, while extracting a significant part of the pollutants from the source runoff.

REFERENCES

1. Olizarenko V. V., Mingazhev M. M. Rudnichnyy vodootliv pri obrabotke medno-kolchedannykh mestorozhdeniy Yuzhnogo Urala [Mine drainage during the processing of copper–pyrrhite deposits of the Southern Urals]. Magnitogorsk, MG TU, 2010, 252 p.

2. Shadrinova I. V., Samoilo va A. S., Glukhova A. Yu. Gidromineralnye medsoderzhashchie georesursy Urala [Hydromineral copper–containing geological resources of the Urals]. Magnitogorsk, Minitip, 2006, 156 p.

3. Malyshev Yu. N., Ayruni A. T., Kulikova E. Yu. Fiziko–khimicheskie protsessy pri dobyche poleznykh iskopaemykh i ikh vliyanie na sostoyanie okruzhayushchey sredy [Physico–



chemical processes during mining and their impact on the environment]. Moscow, Izdatelstvo Akademii Gornykh Nauk, 2002, 270 p.

4. Abdrakhmanov R. F. *Gidrogeoeкологиya Bashkortostana* [Hydrogeoeecology of Bashkortostan]. Ufa, Informreklama, 2005, 344 p.

5. Abdrakhmanov R. F., Akhmetov R. M. *Vliyanie tekhnogeneza na poverkhnostnye i podzemnye vody bashkirskogo Zauralya i ikh okhrana ot zagryazneniya i istoshcheniya* [The influence of technogenesis on surface and groundwater of the Bashkir Trans-Urals and their protection from pollution and depletion]. *Geologicheskii sbornik* [Geological collection]. 2007, № 6, P. 266-269.

6. AY, Ugya. *Water Pollution Resulting From Mining Activity : An Overview* / AY. Ugya, Ajibade Fidelis, Ajibade Temitope, 2018.

7. Akabzaa, T. M. *Impact of Mining Activities on Water in the Vicinity of the Obuasi Mine* / Akabzaa T. M., Banoeng-Yakubo B. K, Seyire J. S. – 2005.

8. Bench, D. W. *PCBs, Mining, and Water Pollution* / D. W. Bench // *Mine Design, Operations and Closure Conference*, Polson, Montana, April 27-May 1, 2003. – Montana, 2003.

9. *Evaluation of the Environmental Impact of Mining Industry Enterprises* / A. V. Vorobyev, K. G. Karginov, S. A. Ananikyan, E. S. Odintsova // *Ekologicheskaya ekspertiza* (Environmental Expert Review). – № 3. – P 96-104.

10. Akcil, A. (2006). *Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies* / Akcil A., Koldas S. // *Journal of Cleaner Production*. – 2006. – № 14. – P. 1139-1145.

11. Skousen, Jeffrey (2018). *Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies* / Skousen Jeffrey, Ziemkiewicz Paul, McDonald Louis. // *The Extractive Industries and Society*. – 2018. – 6. 10.1016/j.exis.2018.09.008.

12. Akcil, A. *Acid mine drainage (AMD): causes, treatment and case studies* / Akcil A., Koldas K. J. // *Cleaner Prod.* – 2006. – 14:1139-1146. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2004.09.006.

13. Skousen, J. *Overview of acid mine drainage treatment with chemicals* / Skousen J. // Chapter 29. *Acid Mine Drainage, Rock Drainage, and Acid Sulfate Soils : Causes, Assessment, Prediction, Prevention, and Remediation*. – 2014. – DOI: 10.1002/9781118749197.ch29.

14. Asif, Z. *Environmental management in North American mining sector* / Asif Z, Z. Chen // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2016. – 23(1). – P. 167-179.

15. Johnson MS and Bradshaw AD. 1977. *Prevention of heavy metal pollution from mine wastes by vegetative stabilization*. *Trans Inst Min Metall* 86A:47–55

16. Krzaklewski, W. M. *Pietrzykowski, Selected Physico-Chemical Properties of Zinc and Lead Ore Tailings and their Biological Stabilisation* / W. M. Krzaklewski, // *Water, Air, and Soil Pollution*. – 2002. – 141(1). – P. 125-141.

17. Mendez, M. O. *Phytostabilization Potential of Quailbush for Mine Tailings* / Mendez, M. O., E. P. Glenn, R. M. Maier // *Journal of Environmental Quality*. – 2007. – № 36(1). – P. 245-253.

18. *Uzhas Shemura - ekologicheskaya katastrofa na Severnom Urale* [The horror of the Shemur - an ecological disaster in the Northern Urals]. - URL: <https://www.youtube.com/watch?v=KTfydiIpGms> (accessed: 15.01.2025).

19. Morozova M. A. *Fitoremediatsiya kak metod ochistki pochv* [Phytoremediation as a method of soil purification]. *Nauki o Zemle* [Earth Sciences]. 2018, № 6(33), P. 104-106.

© А. П. Самоделов, 2025

Получено: 16.01.2025 г.