Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-120-124

Оценка закономерностей минерализации техногенных растворов после возгорания колчеданных руд и затопления чаши карьера и подземных выработок

Р.С. Романов[1], В.И. Татарников[2] ✉, П.О. Зубков[2], Б.В. Цховребов[3]
[1] ООО «Гео Генезис», г. Магнитогорск, Российская Федерация
[2] Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация
[3] Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация
✉ tatarnikov_v@ipkonran.ru

Резюме: Рассмотрены закономерности минерализации растворов после возгорания колчеданных руд и пород, затопления чаши карьера и подземных выработок, оценена роль сброса подотвальных оттоков в карьер на формирование вертикальной структуры минерализации техногенных растворов. На основе полевых наблюдений и результатов аналитических исследований характеристик pH, Eh, плотности, общей минерализации, содержания сульфат- и хлорид-ионов, а также концентраций Zn, Cu, Fe по глубине затопления емкости карьера установлено, что подотвальные воды, сбрасываемые в карьер, являются основным источником солевой и металлоионной нагрузки. Высокая минерализация подотвальных вод (десятки г/л по сухому остатку) и изменения плотности растворов формируют перемещение потоков, которые внедряются в водную толщу в основании карьера и приводят к немонотонному вертикальному распределению содержания компонентов в водной среде – невысокое содержание элементов в приповерхностной зоне, повышение концентрации элементов и снижение pH в средних слоях и понижение концентраций элементов в придонном слое. Последнее связано с сорбцией металлов на иловых отложениях пород, обрушенных с бортов карьера. Показано, что такая структура рассолов: верхний слой, минерализация которого обусловлена притоком высокоминерализованных подотвальных вод. Сорбционно-обеднённый придонный слой формируется за счет перемещения вниз более плотных растворов. При разработке мероприятий по экологическому сопровождению мокрой консервации карьера и оценке возможности вовлечения техногенных растворов в промышленную эксплуатацию необходимо базироваться на установленных закономерностях.

Ключевые слова: чаша карьера, техногенные минерализованные растворы, подотвальные стоки, изменение плотности, стратификация, иловые отложения, сорбция металлов

Для цитирования: Романов Р.С., Татарников В.И., Зубков П.О., Цховребов Б.В. Оценка закономерностей минерализации техногенных растворов после возгорания колчеданных руд и затопления чаши карьера и подземных выработок. *Горная промышленность*. 2025;(5S):120–124. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-120-124

Assessment of mineralization patterns in man-made solutions upon ignition of pyrite ores and flooding of the pit bowl and underground workings

R.S. Romanov[1], V.I. Tatarnikov[2] ✉, P.O. Zubkov[2], B.V. Tskhovrebov[3]
[1] LLC Geo Genesis, Magnitogorsk, Russian Federation
[2] Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
[3] Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russian Federation
✉ tatarnikov_v@ipkonran.ru

Abstract: The paper examines mineralization patterns in solutions upon ignition of pyrite ores and rocks and flooding of the pit bowl and underground workings, while assessing the role of the underspoil runoff discharge into the pit in forming the vertical mineralization structure in man-made solutions. Based on field observations and analytical data on pH, Eh, density,

total dissolved solids, sulfate and chloride ion contents, as well as Zn, Cu and Fe concentrations vs. the depth in the pit lake, it is shown that underspoil runoff is the main source of the salt and metal load. Their high mineralization (tens of g/L of solids) and elevated density generate density currents that penetrate into the water layer of the pit lake and lead to a non-monotonic vertical distribution of components: minimum concentrations in the near-surface zone, elevated values at the intermediate depths, and a subsequent decrease in concentrations in the bottom layer due to sorption of metals into the bottom muds. It is demonstrated that this three-layer structure, i.e. the "diluted upper layer – mineralized intermediate layer – sorption-depleted bottom layer", is a stable feature of the hydrochemical structure of the pit lake and must be taken into account when developing environmental measures for wet mine closure and for potential involvement of mine-impacted waters in processing.

Keywords: pit bowl, mine-made mineralized solutions, underspoil runoffs, density variations, stratification, bottom sediments, metal sorption

For citation: Romanov R.S., Tatarnikov V.I., Zubkov P.O., Tskhovrebov B.V. Assessment of mineralization patterns in man-made solutions upon ignition of pyrite ores and flooding of the pit bowl and underground workings. *Russian Mining Industry*. 2025;(5S):120–124. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-120-124

Введение

Затопленные открытые и подземные выработки в условиях разработки сульфидных месторождений представляют собой сложные техногенные гидрогеохимические системы, в которых формируются устойчивые кислотные сульфатные дренажи и высокоминерализованные растворы с повышенными содержаниями цветных и железосодержащих компонентов [1–3]. Особое значение приобретает не только общий уровень минерализации, но и её вертикальное распределение, определяющее потенциальную экологическую нагрузку, режим миграции и барьерность среды по отношению к металлам.

Для колчеданных месторождений показано, что техногенные воды формируются в системе «отвалы – подотвальные канавы – чаша карьера – подземные выработки», где подотвальные водоотводные канавы выступают главным каналом поступления солевой и металлоионной нагрузки [4–6]. При этом плотностные свойства подотвальных рассолов (TDS ~32–34 г/л, плотность до 1030 кг/м^3) принципиально отличают их от менее минерализованных карьерных вод (TDS порядка 5–6 г/л), что создаёт условия для формирования плотностной стратификации и внутриводоёмных течений[1] [3].

Цель исследований – обосновать на основе данных натурных наблюдений и результатов аналитических исследований механизм формирования вертикальной структуры минерализации техногенных растворов в затопленной чаше карьера исходя из установленной ведущей роли подотвальных вод и процессов сорбции на иловых отложениях в придонной зоне.

Краткий обзор литературы

Современные представления о гидрохимии техногенных водоемов, сформированных на месте карьеров и отработанных котлованов, исходят из того, что ключевыми факторами их строения являются: соотношение поступающих поверхностных, подземных и подотвальных потоков; плотностная стратификация, обусловленная различиями в минерализации; наличие реакционно-активных донных отложений, способных к сорбции и соосаждению металлов [1–3]. Для кислотных сульфатных систем, связанных с окислением пиритсодержащих руд, типично формирование более тяжёлых высокоминерализованных потоков, скользящих по дну и образующих придонные «языки» повышенной минерализации, которые могут частично обедняться металлами при контакте с илистыми отложениями.

В литературе по горному делу и геоэкологии подчёркивается, что подотвальные потоки, формирующиеся в зонах складирования сульфидных отходов, не только определяют общий ионный баланс техногенных вод, но и задают характер вертикальной дифференциации по плотности и содержанию металлов в чаше карьера [4; 7; 8]. Эти потоки часто имеют минерализацию на порядок выше, чем вода в основном объёме, и именно они играют ведущую роль в поддержании кислой сульфатной среды и устойчиво относительно высоких концентраций металлов. Для снижения экологического риска рекомендуется учитывать гидравлическую стратификацию и создавать искусственные или усиленные естественные сорбционные барьеры в придонной части водоемов. Эти общие положения находят прямое подтверждение в натурных наблюдениях на колчеданных месторождениях [7–9].

Объект и методы исследований

Объектом исследования являются затопленные чаши карьеров по разработке колчеданных месторождений, находящиеся в гидравлической связи с подотвальными водоотводными канавами, по которым в карьеры поступают высокоминерализованные кислые сульфатные рассолы, сформированные в зоне отвалов [5].

Отбор проб из чаши карьера осуществлялся по центру и сторонам света (Ц, С, В, Ю, З) на фиксированных горизонтах 0, 50 и 100 м от зеркала воды, что позволило проанализировать вертикальное распределение pH, Eh, плотности, общей минерализации, концентраций сульфат- и хлорид-ионов, а также содержаний Zn, Cu, Fe.

Аналитическая обработка включала определение общей минерализации (сухой остаток), ионного состава и содержания металлов методами атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС) с последующим сопоставлением из-

1 Water Management Studies: Pit Lake Water Quality Review (Appendix F). GHD Pty Ltd for U.S. EPA. Perth; 2021. 78 p. Available at: https://www.epa.wa.gov.au (accessed: 27.04.2025).

Таблица 1
Распределение концентраций Zn, Cu и Fe в затопленном карьере по вертикали и сторонам света (глубины 0, 50 и 100 м) согласно результатам ААС

Table 1
Distribution of Zn, Cu, and Fe concentrations in the flooded pit in the vertical and cardinal directions (depths of 0, 50, and 100 m), according to the results of atomic absorption spectrometry

Место отбора		Центр	Центр	Центр	Север	Север	Север	Восток	Восток	Восток	Юг	Юг	Юг	Запад	Запад	Запад
Глубина от зеркала воды, м		0	50	100	0	50	100	0	50	100	0	50	100	0	50	100
Результаты с ААС	Zn, мг/л	33	30	36	33	31	31	33	30	29	35	31	32	32	31	32
	Cu, мг/л	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	2	3
	Fe, мг/л	5	33	23	6	19	28	5	27	5	6	23	14	5	26	17

менения соответствующих характеристик по сезонам года (паводок, лето, осень) и глубинам. Для подотвальных канав определялись те же характеристики, что позволило оценить их вклад в формирование гидрохимического режима минерализованных рассолов в чаше карьера [2].

Результаты и обсуждение

Результаты исследований однозначно свидетельствуют, что подотвальные водоотводные канавы являются основным источником поступления солевой и металлоионной нагрузки в чашу карьера. В подотвальных потоках фиксируется наиболее высокая минерализация – до десятков г/л по сухому остатку при сравнительно невысоких содержаниях Cl^- (десятки мг/л), что согласуется с преобладанием сульфатных солей многовалентных катионов Fe, Al, Mg, Ca[2] [4; 10].

Плотность растворов в чаше карьера достигает ~1030 кг/м³, тогда как плотность воды при минерализации ~5–6 г/л находится на уровне 1001–1007 кг/м³. Такая разница в плотности вод приводит к формированию устойчивой плотностной стратификации: более тяжёлые подотвальные растворы имеют тенденцию погружаться под менее минерализованные карьерные воды, формируя внутриводоёмные тяжёлые потоки[3] [3]. Характер изменения pH и Eh в растворах, отобранных из чаши карьера и подотвальных канав, схож, но для подотвальных вод характерна в 5–6 раз более высокая минерализация и, как следствие, более высокая плотность растворов, что критично для гидравлической стратификации.

Именно тяжёлые высокоминерализованные потоки, поступающие по подотвальным канавам, определяют фон содержания в них сульфатов и металлов, задают форму вертикального профиля концентраций.

Анализ результатов табл. 1 и рис. 1 показал, что для ряда ключевых показателей содержаний (Fe, Zn и в меньшей степени общей минерализации) характерно немонотонное вертикальное распределение содержания металлов в чаше карьера [1; 2; 10].

Типичная картина по центральному разрезу такова: у

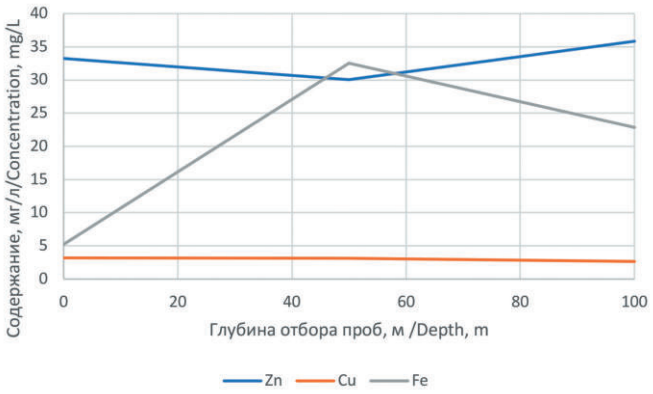

Рис. 1
Вертикальное распределение концентраций Zn, Cu и Fe в чаше карьера

Fig. 1
Vertical distribution of the Zn, Cu, and Fe concentrations in the pit bowl

поверхности (0 м) – относительно низкие содержания Fe и несколько меньшая минерализация; на промежуточном горизонте (50 м) – максимум содержания Fe и повышенные значения общей минерализации; у дна (100 м) – снижение концентраций Fe (и в ряде случаев Zn) по сравнению с промежуточным слоем при близких или слегка изменяющихся значениях TDS.

Для весеннего периода в центральной части карьера содержание Fe возрастает от ~8,4 мг/л у зеркала воды до ~53,9 мг/л на глубине 50 м и затем снижается до ~16,4 мг/л на глубине 100 м. Аналогичная тенденция фиксируется и осенью: изменение содержания Fe от 5,23 мг/л (0 м) до 32,53 мг/л (50 м) с последующим уменьшением до 22,84 мг/л на глубине 100 м при практически неизменной общей минерализации (~5,9 г/л).

По периметру (север, восток, юг, запад) наблюдается тот же тип профиля: приповерхностные воды характеризуются минимальными значениями Fe и несколько меньшей плотностью, средний слой (50 м) – характеризуется максимумом концентраций Fe (а в ряде случаев и Zn), тогда как придонные пробы отражают умеренное снижение содержаний металлов на фоне близкой общей минерализации.

2 Water Management Studies: Pit Lake Water Quality Review (Appendix F). GHD Pty Ltd for U.S. EPA. Perth; 2021. 78 p. Available at: https://www.epa.wa.gov.au (accessed: 27.04.2025).

3 Water Management Studies: Pit Lake Water Quality Review (Appendix F). GHD Pty Ltd for U.S. EPA. Perth; 2021. 78 p. Available at: https://www.epa.wa.gov.au (accessed: 27.04.2025).

Таким образом, вертикальный профиль накопленных в чаше карьера растворов описывается как трёхчленная структура [1; 10]: верхний разбавленный приповерхностный слой характеризуется более низким содержанием металлов за счёт смешения с атмосферными и подземными водами; в промежуточном слое фиксируется повышенная концентрация металлов за счет проникновения и частичного рассеивания более тяжёлых подотвальных потоков; нижний сорбционно-обеднённый придонный слой, где концентрации Fe и других металлов снижаются из-за сорбции и осаждения на иловых отложениях в твёрдой фазе.

Общая минерализация по глубине изменяется менее контрастно, чем концентрация Fe, что указывает на то, что вертикальная структура особенно чётко проявляется в распределении именно металлосодержащих компонентов, а не по суммарному солесодержанию элементов.

Сочетание плотностных и геохимических факторов позволяет интерпретировать выявленную закономерность следующим образом. Приповерхностная зона (0 м) находится под максимальным влиянием атмосферных осадков и менее минерализованных подземных притоков, что ведёт к разбавлению поступающих снизу и с бортов карьера тяжёлых рассолов и, как следствие, к сравнительно низким концентрациям Fe и других металлов. Тяжёлые подотвальные воды, поступающие по канавам, имея более высокую плотность и минерализацию, погружаются в толщу карьерной воды и формируют промежуточный слой повышенной минерализации с более высоким содержанием металлов. На глубинах порядка 50 м фиксируются максимальные значения Fe, что согласуется с представлением о «языках» тяжёлых вод, внедряющихся под более лёгкую приповерхностную толщу, но ещё не достигших придонной сорбционной зоны. При дальнейшем перемещении тяжёлых потоков в сторону дна возрастает роль сорбционных и осадочных процессов [11]. В этих условиях металлосодержащие компоненты фиксируются в твёрдой фазе, а концентрации Fe и частично Zn в придонной воде снижаются, по сравнению с промежуточным слоем, формируя наблюдаемый спад содержания металлов вблизи дна карьера.

Дополнительным фактором является редокс-контроль: при повышении Eh до 240–242 мВ Fe^{2+} окисляется до Fe^{3+} с последующим образованием малорастворимых гидроксидов и их фиксацией в осадке, что также способствует снижению растворённых концентраций Fe в придонной зоне.

В совокупности это создаёт устойчивую картину: подотвальные потоки придают системе металлоёмкий промежуточный максимум, поверхностное разбавление формирует относительно чистый верхний слой, придонная сорбционная и осадочная зона отвечает за самоочищение воды и формирование слоя пониженных концентраций металлов при сохранении относительно высокой общей минерализации.

Заключение

1. Подотвальные водоотводные канавы карьера медно-колчеданного месторождения являются главными носителями солевой и металлоионной нагрузки: их минерализация достигает десятков г/л при плотности растворов до ~1030 кг/м³, что в 5–6 раз превышает минерализацию карьерных вод. Это обуславливает формирование плотностных течений и является ключевым фактором гидрохимического строения затопленного карьера.
2. Вертикальное распределение концентраций металлов в чаше карьера носит немонотонный характер: при минимальных содержаниях металлов у зеркала воды фиксируются максимумы в средней части водной толщи и последующее снижение концентраций в придонном слое при относительно слабой изменчивости общей минерализации. Наиболее отчётливо эта закономерность прослеживается при анализе содержания железа.
3. Установленная трёхчленная вертикальная структура: «разбавленный приповерхностный слой – минерализованный промежуточный слой – сорбционно-обеднённый придонный слой» – объясняется совокупным влиянием разбавления подотвальных рассолов в верхней части карьера, внедрением тяжёлых подотвальных потоков в толщу воды с формированием промежуточных максимумов концентраций металлов, сорбцией и соосаждением металлов в зоне иловых отложений у дна карьера.
4. С точки зрения горной экологии и геотехнологии полученная модель подчёркивает, что именно управление притоком и рассредоточением подотвальных вод, а также целенаправленная работа с придонной сорбционной зоной (формирование иловых барьеров, селективное водопонижение, локальная очистка) являются наиболее эффективными направлениями для контроля минерализации и содержания металлов в чаше карьера при мокрой консервации рудника.

Список литературы / References

1. Fuentes-López J.M., Olías M., León R., Basallote M.D., Macías F., Moreno-González R., Cánovas C.R. Stream-pit lake interactions in an abandoned mining area affected by acid drainage (Iberian Pyrite Belt). *Science of The Total Environment* 2022;833: 155224. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155224
2. Martin A.J., Salvador S., Fraser C. Strategies for pit lake water management and in-pit bioremediation. In: *12th International Conference on a Rock Drainage (ICARD) 2022. VIRTUAL, Australia, September 18–24, 2022.* Available at: https://www.researchgate.net/publication/364213929 (accessed: 27.04.2025).

3. Thisani S.K., Kallon D.V.V., Byrne P. Geochemical classification of global mine water drainage. *Sustainability*. 2020;12(24):10244. https://doi.org/10.3390/su122410244

4. Mugova E., Wolkersdorfer C. Density stratification and double-diffusive convection in mine pools of flooded underground mines – A review. *Water Research*. 2022;214:118033. https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.118033

5. Sánchez-España J., Díez-Ercilla M., Pérez-Cerdán F.L., Yusta I., Boyce A.J. Hydrological investigation of a multi-stratified pit lake using radioactive and stable isotopes combined with hydrometric monitoring. *Journal of Hydrology*. 2014;517:494–508. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.003

6. Soni A., Mishra B., Singh S. Pit lakes as an end use of mining: A review. *Journal of Mining and Environment*. 2014;5(2):66–111. Available at: https://jme.shahroodut.ac.ir/article_326_47.html (accessed: 27.04.2025).

7. McCullough C.D., Schultze M., Vandenberg J., Castendyk D. Mine waste disposal in pit lakes: a good practice guide. In: Fourie A.B., Tibbett M., Boggs G. (eds). Mine Closure 2024: *Proceedings of the 17th International Conference on Mine Closure, Perth, Australia, November 26–28, 2024*. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2024, pp. 1063–1076. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2415_76

8. McCullough C.D. Below water table mining, pit lake formation, and management considerations for the Pilbara mining region of Western Australia. *Mining*. 2024;4(4):863–888. https://doi.org/10.3390/mining4040048

9. Gammons C.H., Harris L.N., Castro J.M., Cott P.A., Hanna B.W. *Creating lakes from open pit mines: processes and considerations - with emphasis on northern environments*. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2826. 2009. 106 p. Available at: https://digitalcommons.mtech.edu/geol_engr/2/ (accessed: 27.04.2025).

10. Lazo D. Acid mine drainage mitigation: A review. *Ingeniería Industrial*. 2020;(39):97–118. https://doi.org/10.26439/ing.ind2020.n039.4917

11. McCullough C.D. (ed.) *Mine Pit Lakes: Closure and Management*. London: Geological Society Publishing; 2011.

Информация об авторах
Романов Роман Сергеевич – технический директор ООО «Гео Генезис», г. Магнитогорск, Российская Федерация
Татарников Валентин Игоревич – аспирант, младший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: tatarnikov_v@ipkonran.ru
Зубков Павел Олегович – аспирант, младший научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация
Цховребов Бадила Владимирович – магистрант, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация

Информация о статье
Поступила в редакцию: 26.10.2025
Поступила после рецензирования: 01.12.2025
Принята к публикации: 01.12.2025

Information about the authors
Roman S. Romanov – Technical Director, LLC Geo Genesis, Magnitogorsk, Russian Federation
Valentin I. Tatarnikov – Postgraduate Student, Junior Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: tatarnikov_v@ipkonran.ru
Pavel O. Zubkov – Postgraduate Student, Junior Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Badila V. Tskhovrebov – Master's Student, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russian Federation

Article info
Received: 26.10.2025
Revised: 01.12.2025
Accepted: 01.12.2025