



РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-5-17>**Оценка эффективности гидрогеологической и окружающей среды при подземном блочном выщелачивании металлов из руд**В. И. Ляшенко¹  , В. И. Голик^{2,3}  , Р. В. Ключев³  ¹ Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии, г. Желтые Воды, Украина² Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ), г. Владикавказ, Российская Федерация³ Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация✉ vilyashenko2017@gmail.com**Аннотация**

Одним из самых проблемных мест подземного блочного выщелачивания (ПБВ) металлов из руд является возможность загрязнения водной и воздушной среды в зоне их влияния. Поэтому доказательство возможности минимизации последствий ПБВ металлов из руд путем управления технологическими процессами в рамках реализации природо- и ресурсосберегающих технологий актуально. Цель исследования – обоснование эффективности подземной разработки рудных месторождений традиционными и комбинированными технологиями с выщелачиванием металлов из скальных некондиционных и забалансовых руд. Это обеспечит повышение сырьевой базы добычи металлов из забалансовых руд и улучшит охрану недр, гидрогеологической и окружающей среды. Отличительной особенностью ПБВ (подземного участка по выщелачиванию металлов из замагазинированных руд) является то, что выщелачивающие растворы подаются из сорбционной колонны, размещенной в горных выработках горизонта орошения в непосредственной близости от эксплуатационного блока. Выдачу продуктивных растворов в виде смолы осуществляют из сорбционной колонны, размещенной в горных выработках горизонта орошения, в вагонетках на дневную поверхность и далее в цистернах на гидрометаллургический завод. Исследованию подвергается пока еще редкий опыт обоснования эффективности и экологической безопасности ПБВ металлов из забалансовых и некондиционных скальных руд в установках, смонтированных в горных выработках, на основании мониторинга и оценки охраны недр, гидрогеологической и окружающей среды. Выявлено усредненное значение концентрации урана по горизонтам: 210 м – 3,6 мг/л; 225 м – 3,58 мг/л; 280 м – 0,91 мг/л. При этом загрязнения подземных шахтных вод не обнаружено. Уровень аэрозолей серной кислоты и продуктов распада радона не превышал значений предельно-допустимой концентрации. Рекомендовано охрану гидрогеологической среды производить заиливанием глинистым раствором днища камеры по сбору продуктивных растворов, сооружать полуактивные водопроницаемые химически активные барьеры. Указанная технология ПБВ внедрена при отработке опытного блока 5–86 и рекомендована для блоков 5–84–86 и 5–88–90 Мичуринского месторождения ГП «ВостГОК», Украина, а также при разработке рудных месторождений Российской Федерации, Республики Казахстан.

Ключевые слова

рудные месторождения, подземное блочное выщелачивание, установки, горные выработки, мониторинг, гидрогеологическая и окружающая среда, эффективность

Благодарности

Авторы выражают благодарность Ю. Н. Тархину, Н. А. Худошиной, Л. А. Ляшенко, А. Х. Дудченку, А. А. Ткаченко (ГП «УкрНИПИИпромтехнологии»), В. Н. Пухальскому, П. М. Куче, А. В. Копаневу, В. В. Синчуку, В. А. Меркулову (ГП «Восточный ГОК») и другим специалистам этих предприятий за содействие во внедрении полученных научных и практических результатов исследований.

Для цитирования


Lyashenko V. I., Golik V. I., Kluev R. V. Evaluation of the efficiency and environmental impact (on subsoil and ground-water) of underground block leaching (UBL) of metals from ores. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(1):5–17. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-5-17>



MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

Research article

Evaluation of the efficiency and environmental impact (on subsoil and groundwater) of underground block leaching (UBL) of metals from ores

V. I. Lyashenko¹   , V. I. Golik^{2,3}  , R. V. Klyuev³  ¹ Ukrainian Research and Design and Survey Institute of Industrial Technology, Yellow Waters, Ukraine² North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (GTU), Vladikavkaz, Russian Federation³ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation vilyashenko2017@gmail.com

Abstract

One of the most problematic aspects of underground block leaching (UBL) of metals from ores is the possibility of pollution of water and air in the affected zone. Therefore, proving the possibility of mitigating environmental impact of metal leaching from ores by managing production processes with the implementation of nature- and resource-saving technologies is an important objective. The purpose of this study is to justify underground development effectiveness of ore deposits by traditional and integrated methods with leaching of metals from substandard and off-balance ores. This will allow the raw material base for extraction of metals from off-balance ores to be expanded and the environmental impact on subsoil and groundwater (hydrogeological systems) to be mitigated. A distinctive feature of a UBL (underground site for leaching of metals from shrunk ores) is that leaching solutions are supplied from sorption column placed in mining workings of the leaching level in the immediate vicinity of the extracting block. The pregnant solutions in the form of resin are discharged from the sorption column, placed in the leaching level mine workings, then winded in mine cars and further supplied to hydrometallurgical plant in tanks. A still rare attempt to justify the efficiency and environmental safety of underground metal leaching (UBL) from off-balance and substandard rock ores in installations mounted in mine workings, on the basis of monitoring and evaluation of subsoil and groundwater conditions was investigated. The average value of uranium concentration by level was established: 210 m – 3.6 mg/L; 225 m – 3.58 mg/L; 280 m – 0.91 mg/L. At the same time no contamination of underground mine waters was detected. Levels of sulfuric acid aerosols and radon decomposition products did not exceed the maximum allowable concentration (MAC) values. It is recommended that the hydrogeological environment be protected through silting the bottom of the stope for collection of pregnant solutions with clay mud and construct semi-active water-permeable chemically active barriers. The mentioned BIL process was implemented during the development of pilot block 5-86 and recommended for blocks 5-84-86 and 5-88-90 of Michurinskoye deposit of SE VostGOK, Ukraine, as well as during for development of ore deposits in Russia, Kazakhstan, and other developed mining countries.

Keywords

ore deposits, underground block leaching (UBL), installations, mine workings, monitoring, hydrogeological systems and environment, groundwater, performance

Acknowledgements

The authors are grateful to Y.N. Tarkhin, N.A. Khudoshina, L.A. Lyashenko, A.H. Dudchenko, A.A. Tkachenko (SE “UkrNIPromtekhnologii”), V.N. Pukhalsky, P.M. Kucha, A.V. Kopanov, V.V. Sinchuk, V.A. Merkulov (SE “Vostochny GOK”), and other specialists of these enterprises for assistance in the implementation of the obtained scientific and practical findings of the research.

For citation

Lyashenko V.I., Golik V.I., Kluev R.V. Evaluation of the efficiency and environmental impact (on subsoil and ground-water) of underground block leaching (UBL) of metals from ores. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(1):5-17. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-5-17>

Введение

С увеличением объемов подземной добычи руд растет объем отходов на поверхности и в подземных выработках, что повышает темпы загрязнения окружающей среды [1, 2]. Многие участки эксплуатируемых месторождений представляют собой раздробленную горную массу, являющуюся базой для неуправляемого процесса природного выщелачивания [3, 4]. Поэтому

доказательство возможности минимизации последствий природного выщелачивания путем управления технологическими процессами в рамках реализации ресурсосберегающих технологий актуально [5, 6]. Ниже приведены основные научные и практические результаты исследований комбинированных технологий разработки рудных месторождений, относящихся как к технологиям обогащения и гидрометаллургии,

так и технологиям подземной добычи (физико-химическим геотехнологиям) полезных ископаемых [7, 8]. Данная работа является продолжением исследований с участием авторов, основные научные и практические результаты которых наиболее полно приведены в работах [9, 10].

Цель исследования – обоснование эффективности подземной разработки рудных месторождений традиционными и комбинированными технологиями с выщелачиванием металлов из скальных некондиционных и забалансовых руд. Это обеспечит повышение сырьевой базы добычи металлов из забалансовых руд и улучшит охрану недр, гидрогеологической и окружающей среды.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Проанализировать факторы, влияющие на эффективность и экологическую безопасность подземной разработки рудных месторождений с выщелачиванием металлов.

2. Выявить условия и источники возможного загрязнения водной и воздушной среды в зоне влияния подземного блочного выщелачивания металлов из руд.

3. Разработать мероприятия для снижения отрицательного влияния на окружающую среду подземного блочного выщелачивания металлов из руд.

4. Рекомендовать перспективные исследования, влияющие на повышение эффективности и экологической безопасности подземного блочного выщелачивания металлов из руд.

Методы исследований

Для обобщения, критического анализа и прогнозирования научных достижений в области технологии и технических средств подземной добычи руд, подземной геотехнологии, взрывного разрушения твердых сред использованы методы механики сплошных сред, математической статистики и исследования волновых процессов по стандартным и новым методикам.

Обсуждение результатов

Технологический аудит подземного блочного выщелачивания металлов из руд

Известные способы извлечения металлов из рудного сырья не являются безотходными, так как для полной утилизации хвостов нужно будет затратить еще больше средств и энергии. Не улучшаются и экологические последствия, так как вторичные хвосты в процессе хранения и переработки активизируются и мигрируют в окружающую среду. Значительная экономическая эффективность отличает новую технологию от известных тем, что нет необходимости её извлечения на поверхность [11, 12].

На Гумешевском месторождении подземное блочное выщелачивание руд осуществляется с 2005 г. На рудниках «Приаргунского производственного горно-химического объединения» (г. Краснокаменск, Российская Федерация) применяют системы разработки с выщелачиванием металла из магазинированных в камере руд в промышленных масштабах. Геотехнологические способы получения металлов в РСО–Алания известны со второй половины прошлого века [13, 14].

Влияние природного выщелачивания руд на экологию исследуется на практике предприятий Северного Кавказа, где содержание продуктов природного выщелачивания руд на 2–3 порядка превышает санитарные нормы. В частности, река Баксан (Кабардино-Балкария) на участке Тырныузского месторождения принимает стоки вольфрамово-молибденового комбината, содержащие вольфрам и молибден. В Алагирском районе Республики Северная Осетия–Алания на участке Садонских месторождений река Ардон загрязняется медью, свинцом и цинком [15, 16].

Альтернативой традиционным технологиям разработки указанных месторождений может быть технология с переводом полезного компонента из руды в раствор. Руда магазинируется в блоках. Просочившись через толщу руды, продуктивный раствор реагентов собирается в днище, откуда направляется на переработку (рис. 1).

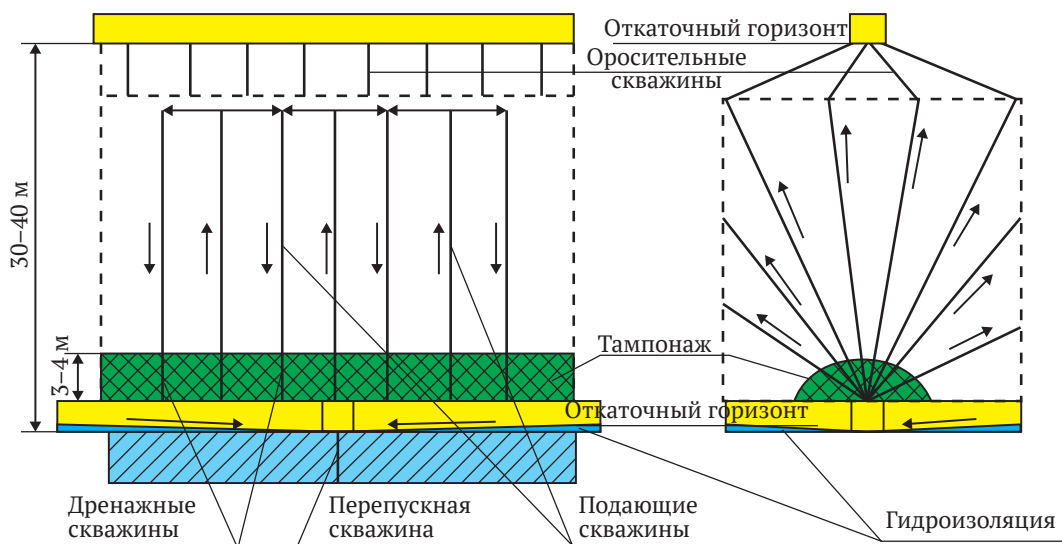


Рис. 1. Подготовка рудных тел к выщелачиванию без дробления руды

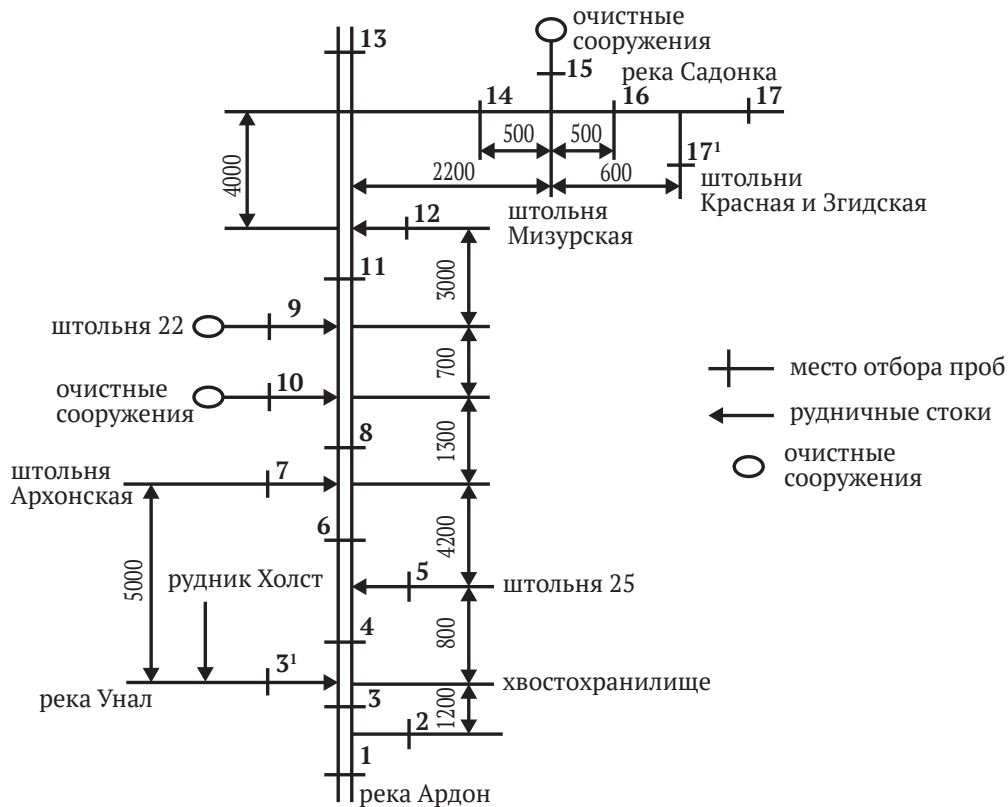


Рис. 2. Схема опробования акватория реки Ардон

На Какадурском месторождении (Северная Осетия) при подземном блоковом выщелачивании руд с содержанием свинца 0,99 %, цинка 0,71 % обрабатывали не отдельный участок некондиционных для традиционной технологии запасов, а всего месторождения. Профессор И.А. Остроушко доказал его целесообразность и добился реализации. Новая технология выщелачивания минералов в дезинтеграторе основана на том, что при скорости удара 250 м/с их технологические свойства изменяются. При переработке хвостов обогащения Садонских руд в дезинтеграторе извлечено 22% свинца и 76% цинка от их исходного количества в первичных хвостах. Путем многократной переработки содержание доводится до требуемого уровня [17, 18]. Количество металлов в растворах природного выщелачивания коррелирует с содержанием ускорителей процесса – железосодержащих минералов, и замедлителей – кальция и магния. Для оценки особенностей рудничных стоков в реке Ардон были исследованы пробы воды (рис. 2).

Объединение возможностей предприятий, например, свинцово-цинкового комбината и ОАО «Кавдоломит» (РСО–Алания, Российская Федерация) имеет природоохранную значимость, так как заполнение выработанного пространства закладочной смесью на основе вяжущих из доломита уменьшит потери руд при отбойке. Для получения вяжущей фракции доломита применяют мельницы, в которых удельная поверхность доломитов увеличивается до 3000 см²/г, что повышает активность вяжущих добавок на 20–30 % [19, 20]. Одним из лучших способов снижения количе-

ства отходов радиоактивных веществ на поверхности земли, сокращения объемов закладки и увеличения производительности предприятия в процессе выпуска продукции является добыча подземным блочным выщелачиванием металлов из отбитых руд (рис. 3).

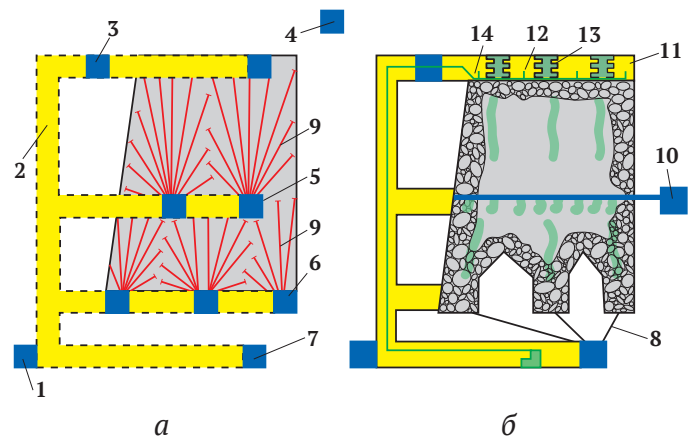


Рис. 3. Технология подземного блочного выщелачивания металлов из отбитых руд:

а и б – разбуривание и выщелачивание замаганизированных руд в блоке:

- 1 – штрек;
- 2 – восстающий;
- 3 – штрек для орошения;
- 4 – штрек;
- 5 – буровые штреки;
- 6 – дренажно-буровые штреки;
- 7 – дренажный штрек;
- 8 – дренажные скважины;
- 9 – промежуточный горизонт орошения;
- 10 – промежуточный горизонт орошения;
- 11 – штрек для орошения;
- 12 – верхняя подсечка;
- 13 – костровая крепь;
- 14 – оросительная система

Технология выщелачивания металла из скальных руд в установках, размещенных в горных выработках, иллюстрируется рис. 4.

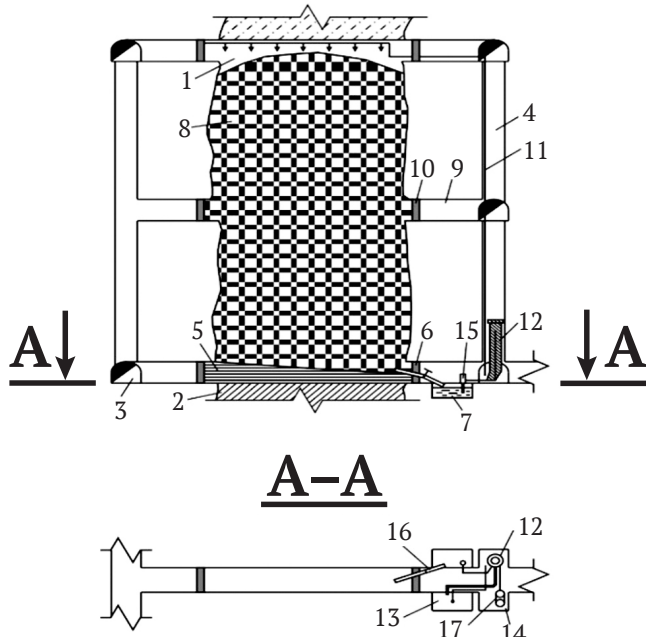


Рис. 4. Технологическая схема выщелачивания металла из скальных руд в подземных установках:

- 1 – камера; 2 – рудное тело; 3, 4 – горизонтальные и вертикальные выработки; 5 – изоляционный материал;
- 6 – изоляционная перегородка; 7 – емкость;
- 8 – магазинированная руда; 9 – выработка;
- 10 – изолирующая перегородка; 11 – трубопровод;
- 12 – аппараты для сорбционной переработки продуктивных растворов; 13 – емкость для приготовления выщелачивающего раствора; 14 – ниши; 15 – насосы;
- 16 – труба; 17 – аппарат десорбции металла

Рудное тело 2 разделяют на эксплуатационные блоки, проходят горноподготовительные и нарезные выработки. Бурение проводится скважинами диаметром 50–85 мм из поэтажных выработок 9. Частичный выпуск замагазинированной руды 8 осуществляют на откаточный горизонт. В верхней части камеры 1 монтируют оросительную систему, состоящую из труб 11 и форсунок, а в нижней оборудуют выработки 7 для сбора продуктивных растворов [21, 22].

Аппаратурная схема промышленного освоения технологии ПБВ представлена на рис. 5. Она включает: железнодорожную цистерну; насосы типа F430 PP – 50/38; X 80–50–250 E; ПР63; АХ 125–100–400E и X50–32–125; емкость для низкосортной кислоты; сливное устройство; автоцистерну и емкость для смолы; погружной насос типа F-706 PP-185; зумпфы для растворов продуктивных, нейтрализации и выщелачивающих; гидроподъемник; емкости объемом 0,4 и 0,8 м³; сорбционную колонну типа СНК; трубопровод; эжектор; свободную емкость; емкости для подкисления и нейтрализации; таль ручную грузоподъемностью до 1 т.

Выщелачивающий и продуктивные растворы перекачивают из нижележащего на вышележащий горизонт без выдачи их на дневную поверхность. На днев-

ную поверхность продукцию выдают в виде смолы для дальнейшей переработки на ГМЗ. По сути в шахте сооружают подземный участок по выщелачиванию металлов из скальных руд в блоках ПБВ с переработкой растворов в установках, размещенных в подземных выработках. Авторы указывают на то, что данный метод позволяет существенно сократить операции, применяющиеся в традиционной системе добычи [23, 24] (кроме таких, как: создание компенсационного пространства, выпуск и доставка до 30 % замагазинированной руды из камеры ПБВ и др.).

Мониторинг гидрогеологической и окружающей среды

Система мониторинга окружающей среды включает в себя трехступенчатый контроль и позволяет решать следующие задачи: осуществлять контроль за состоянием шахтных вод; определять зоны загрязнения шахтного воздуха; обнаруживать аварийное загрязнение окружающей среды; обеспечивать органы управления предприятия.

Результаты исследований

Для наблюдения за возможной миграцией из камеры блока и зумпфа в направлении основания блока пробурено шесть восстающих наблюдательных скважин (рис. 6). Первый уровень мониторинга состояния водной среды проводился ежемесячно по величине водородного показателя pH шахтной воды в наблюдательных скважинах обслуживающим персоналом опытного блока.

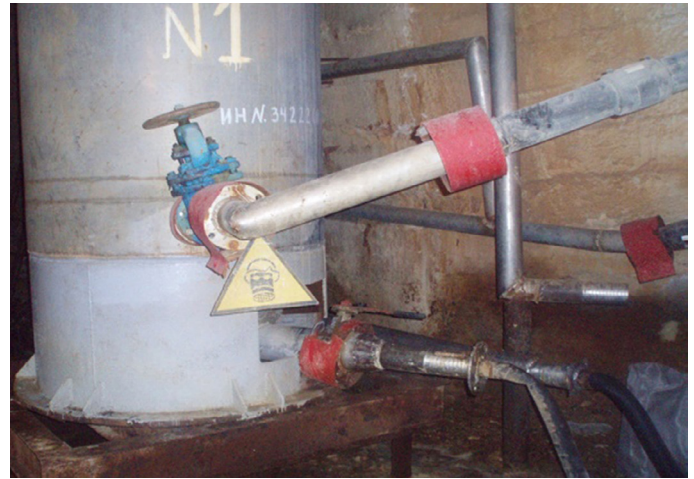
В процессе эксперимента произведено 18630 замеров величины pH воды. Наблюдательные скважины за время эксперимента оставались сухими. Показатель pH воды практически соответствовал нейтральному значению 6,5–7,5 и только в 5 случаях значения pH составили 1,5–2,0, что объясняется прорывами трубопроводов, износом запорной арматуры. ореол растекания технологических растворов был локальным и нейтрализован известковым молоком.

Второй уровень мониторинга водной среды проводился по следующим параметрам: содержание урана; щелочность; водородный показатель (pH). За время отработки блока отобрано 882 проб шахтной воды. В табл. 1 представлены результаты мониторинга, усредненные по кварталам. По выполненным анализам усредненное значение концентрации урана равно: горизонт 210 м – 3,6 мг/л; горизонт 225 м – 3,58 мг/л; горизонт 280 м – 0,91 мг/л. Величина pH соответствовала нейтральному значению. Данные наблюдений свидетельствуют о том, что отрицательного влияния опытного блока на качество шахтной воды не обнаружено, при этом наблюдательные скважины оставались полностью сухими [25, 26].

Третий уровень предусматривал также мониторинг воздушной среды. Ежемесячно выполнялся полный химический анализ проб шахтной воды на кальций, магний, натрий, калий, железо общее, карбонаты, бикарбонаты, сульфаты, хлориды, нитраты, нитриты, аммоний сухой остаток, уран, а также ежеквартально – радиохимический анализ на радий–226, торий–230, полоний–210, свинец–210, уран (табл. 1).



а



б



в



г

Рис. 5. Технологическое оборудование для ПБВ на Ингульской шахте ГП «ВостГОК» (фото):
а и б – сорбционные колонны типа СНК; в – насосная с ёмкостью 0,4 м³ и насосом АХ;
г – состав ёмкостей с ионнообменной смолой и разбавленной серной кислотой

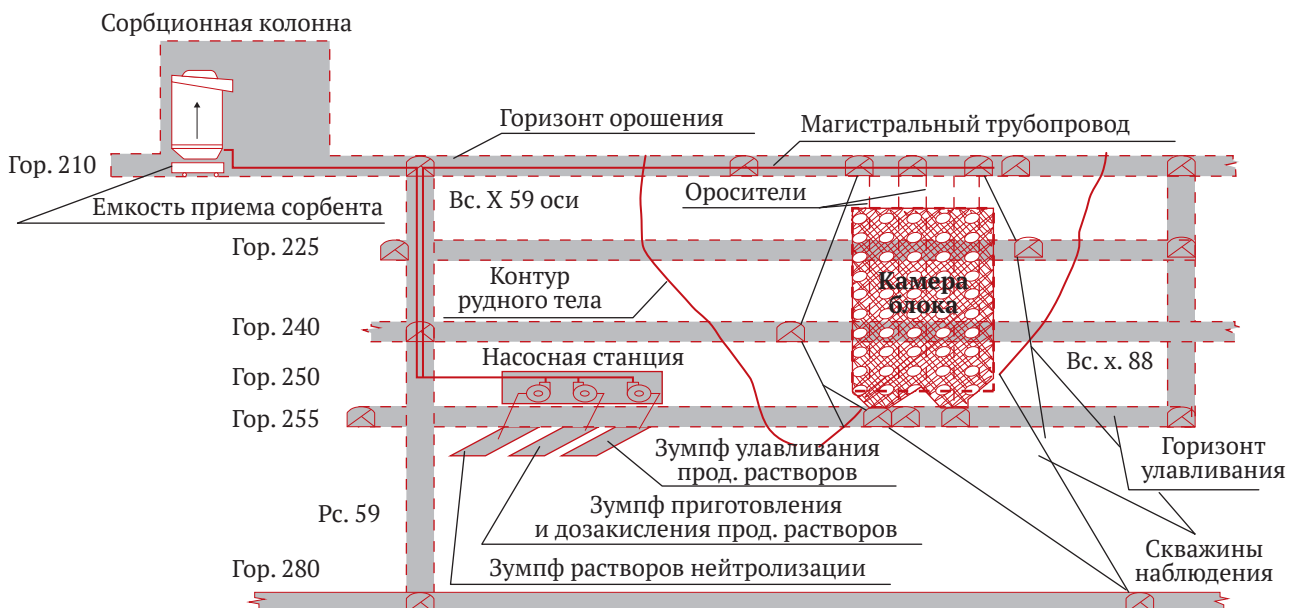


Рис. 6. Технологическая схема подготовки блока к выщелачиванию:

Рс.59 – рудоспуск 59-й оси; Вс. X 59, Вс. X 88 – вентиляционно-ходовой восстающий 59-й и 88-й оси соответственно

Таблица 1

Результаты мониторинга третьего уровня по шахтной воде

Наименование	Место отбора проб	Контролируемые параметры		
		щелочность, мг экв/л	pH	уран, мг/л
До эксперимента	П – 1 П – 2	2,70	7,8	6,7
	П – 3 П – 4	0,50	7,8	0,64
	П – 5 П – 6	5,75	7,9	1,32
Усредненное значение за три года эксперимента	П – 1 П – 2	2,60	7,3	3,60
	П – 3 П – 4	3,21	7,5	3,58
	П – 5 П – 6	5,37	7,7	0,91

За время ведения опыта было отобрано и проанализировано на полный химический анализ 210 проб шахтной воды и 60 проб на радиохимический анализ. Результаты химического и радиохимического состава шахтной воды, а также шахтной воды непосредственно перед установкой очистки шахтных вод на горизонте 2010 м приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты мониторинга третьего уровня по шахтной воде

Объект исследования и определяемый компонент	Шахтная вода	Среднее значение		
		до опыта	во время опыта	после опыта
Уран, мг/л	90	6,7	6,2	4,4
Ra – 226×10^{-11} , Ки/л	20	8,37	6,24	6,7
Th – 230×10^{-11} , Ки/л	20	3,03	2,46	2,2
Pb – 210×10^{-11} , Ки/л	20	32,05	9,53	10,4
Po – 210×10^{-11} , Ки/л	20	2,5	1,18	2,8
SO ₄ ²⁻ , мг/л	70	614	659	691
Cl, мг/л	70	172	166	142
pH, ед.	70	7,6	7,7	8,2
Ca ²⁺ , мг/л	70	145	133	124
Md ²⁺ , мг/л	70	41,3	62,8	52
Na ⁺ , мг/л	70	235	229	220
K ⁺ , мг/л	70	15,5	13,2	12
Fe _{общ} , мг/л	70	0,05	0,05	0,05
NH ₄ , мг/л	70	1,1	0,15	0,1
NO ₃ , мг/л	70	40	15	9
NO ₂ , мг/л	70	26	0,2	0,1
HCO ₃ , мг/л	70	92	157	132
Сухой остаток, мг/л	70	1588	1560	1366

Результаты химического состава шахтной воды показывают, что до момента закисления блока химический состав шахтной воды значительно различается как по времени отбора, так и по месту отбора проб. Так, например, концентрация сульфат-иона колеблется от 403,0 до 998,0 мг/л, содержание урана от 0,35 до 7,30 мг/л. Сравнивая результаты анализов пород, можно сделать вывод о том, что средняя концентрация сульфат-, хлор-иона урана, pH, сухого остатка в пробах, отобранных в ходе проведения эксперимента по ПБВ, не превышала значений в пробах, отобранных до начала закисления отбитой руды.

Существенных изменений состава и концентраций элементов шахтной воды, сбрасываемой в реку Ингул, за период работы блоков ПБВ 5-86; 5-84-86; 5-88-90 не произошло. Один раз в месяц проводился отбор проб на следующие параметры: аэрозоли серной кислоты; содержание радона; мощность экспозиционной дозы гамма-излучения. С начала эксплуатации только блока 5-86 произведено 576 замеров. Анализ результатов, представленных в табл. 3, свидетельствует, что определяемые показатели не превышали показателей проб, отобранных до опыта [27, 28].

Таблица 3

Результаты мониторинга третьего уровня по воздушной среде

Объект исследования и определяемый компонент	Воздушная среда	Среднее значение		
		до опыта	во время опыта	после опыта
<i>Горизонт 210 м</i>				
Аэрозоли серной кислоты, мг/м ³	640	–	0,5	–
Радон, Бк/м ³	64	580	645	110
МЭД, мкР/ч	64	146	206	227
<i>Горизонт 240 м</i>				
Аэрозоли серной кислоты, мг/м ³	128	–	0,26	–
Радон, Бк/м ³	128	513	490	439
МЭД, мкР/ч	128	454	331	312

Оценка полученных результатов

Первоначальные результаты работы показали существенную зависимость эффективности процесса выщелачивания (по временному фактору) от рабочего объема зумпфа продуктивных растворов. Наиболее оптимальным, как выяснилось, является объем в 70–80 м³, а проектный был 20 м³. Первоначальный опыт эксплуатации выявил такой отрицательный фактор, как наличие значительного количества песка и мусора в отрегенированной смоле на ГМЗ. Впоследствии было принято решение по монтажу на ГМЗ автономного узла регенерации смолы для опытных участков ПБВ [29, 30].

При отработке блока 5-86 в соответствии с выданными рекомендациями максимально использовались ранее пройденные выработки. Такой же подход был использован при подготовке к ПБВ опытно-экспериментальных блоков на Мичуринском месторождении 5-84-86 и 5-88-90, а также промышленно-экспериментального блока 1-75-79. Проведен необходимый объем восстановительно-ремонтных работ ранее пройденных выработок. Вместе с тем требуют особого внимания вопросы устойчивости выработок горизонта орошения, расположенного в районе интенсивного влияния отработанных блоков. Рудный массив в этаже 197–210 м ослаблен существующими до подготовки блоков к ПБВ нарезными и очистными выработками, а также сетью скважин создаваемой системы орошения. В этих выработках был организован систематический контроль за их устойчивостью и характером напряженно-деформированного состояния



приконтурного массива (геомеханический и сейсмический мониторинги). Результаты промышленного эксперимента по ПБВ показывают, что в рамках существующей на ГП «ВостГОК» системы подготовки запасов к отработке, с изменением только параметров буровзрывных работ удалось получить в опытном блоке руду оптимального гранулометрического состава. За время эксперимента в раствор переведено около 54 % запасов металла в блоке при расходе кислоты 36 % от проектного. Таким образом, добыча и переработка руд с применением традиционных технологий в современных экономических условиях нецелесообразна при содержании металла в добытой рядовой руде менее 0,070 у.е. (табл. 4).

Таблица 4

**Основные показатели
блочного выщелачивания металла**

Наименование	Показатели
Объем выщелачиваемой руды, тыс. т	8,248
Содержание металла, усл. ед.	0,065
Израсходовано кислоты H ₂ SO ₄ , т	231,1
Удельный расход кислоты, кг/т	28,0
Расход кислоты на закисление, т	27,8
Удельный расход окислителя, кг/т	3,3
Время закисления, сутки	40
Количество растворов, поданных на орошение, м ³	66106
Плотность орошения, л/м ² х ч	9,6
Отношение «Ж:Т», ед.	8:1
Время орошения, сут	166
Продолжительность сорбции, сут	398
Объем растворов на сорбцию, м ³	25756
Характеристика продуктивных растворов: а) концентрация металла, средняя, мг/л б) кислотность, средняя, г/л	220 13,5
Характеристика орошающих растворов: концентрация Fe ⁺³ /Fe ⁺² , г/л минерализация (сухой остаток), г/л	1,9/0,38 43,2
Объем насыщенного анионита металлом, м ³	101,3
Средняя емкость насыщенного сорбита, кг/м ³	27,3
Остаточная емкость отрегенированного сорбента по металлу, кг/м ³	0,66
Промывка «хвостов» в блоке: продолжительность, сут	65
Объем промывных вод, м ³	5775
Удельный расход воды на промывку, м ³ /т	0,7

Преимущества блочного выщелачивания

Отсутствуют затраты на отдельные операции по сравнению с традиционной технологией добычи и переработки руды, а именно:

– при добыче: вторичное дробление и выпуск руды; внутришахтные перевозки руды; выдача руды на поверхность; дробление и обогащение руды; закладка выработанного пространства; погрузка в железнодорожные вагоны и перевозка руды на ГМЗ;

– при переработке на ГМЗ: перегрузка руды; измельчение руды; выщелачивание; сорбция; регенерация смолы; складирование хвостов.

Феномен природного выщелачивания является следствием недостаточного уровня применяемых технологий разработки. Механизм процессов природного выщелачивания металлов адекватен, что открывает возможности управления ими. Радикальным способом минимизации последствий природного выщелачивания является полная утилизация металлосодержащего сырья. Концепция природоохранности пользования недрами предусматривает замену неуправляемого природного выщелачивания технологическим выщелачиванием в контролируемом рабочем пространстве. Уровень знаний о теории и практике извлечения металлов из металлических руд месторождений позволяет использовать технологии с выщелачиванием для восстановления былого потенциала горнодобывающих отраслей [31, 32].

Эффективность

Максимальная эффективность комбинированной технологии разработки с выщелачиванием металлов из руд обеспечивается за счет увеличения извлечения полезных компонентов из недр:

$$M' \geq \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_T}{\varepsilon_n - \varepsilon_2 \varepsilon_3} M, \quad (1)$$

где M – количество полезного компонента в недрах; M' – количество полезного компонента, выдаваемого из недр; ε_n – извлечение металлов из руд технологиями с выщелачиванием; ε_T – извлечение металлов из недр при его отработке традиционной системой (ТС):

$$\varepsilon_T = \frac{M_m}{M} \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3, \quad (2)$$

где M_m – количество металлов ТС; ε_1 – извлечение металлов из недр ТС; ε_2 – извлечение металлов в концентрат; ε_3 – извлечение полезного компонента из концентрата в готовый продукт.

Прибыль от вовлечения некондиционных по содержанию полезных компонентов запасов в производство за счет увеличения объемов добычи, прироста продукции и повышения отдачи капитала для комбинированных технологий выщелачивания определяется согласно математической модели вида:

$$Profit = \sum_1^n \left[\left(C_{ore}^b - C_{ext}^b - C_{enr}^b - C_{met}^b \right) \cdot V_b^{sel} + \left(C_{ore}^{comb} - C_{ext}^{comb} - C_{enr}^{comb} - C_{met}^{comb} \right) - D_0 \right] \cdot V_{comb}^{sel}, \quad (3)$$

где $Profit$ – годовая прибыль от комбинирования технологий, ден. ед.; $C_{ore}^b, C_{ore}^{comb}$ – соответственно стоимость реализации металлов из балансовых и комбинированных запасов руд, ден. ед./т; $C_{ext}^b, C_{enr}^b, C_{met}^b$ – соответственно затраты на добычу, обогащение и металлургический передел балансовых руд, ден. ед./т; $C_{ext}^{comb}, C_{enr}^{comb}, C_{met}^{comb}$ – соответственно затраты на добычу, обогащение и металлургический передел комбинированных запасов руд, ден. ед./т; $V_b^{sel}, V_{comb}^{sel}$ – соответственно объем селективно добытых балансовых и комбинированных руд, т; n – номенклатура извлекаемых металлов; D_0 – суммарный ущерб (экономические последствия), наносимый (–) окружаю-



щей среде или предотвращаемый (+) с учетом затрат на хранение загрязняющих веществ и защиту населения, проживающего в зоне влияния горных объектов, ден. ед.

Таким образом, внедрение в промышленных масштабах ПБВ значительно улучшит экономические показатели производства, что позволило бы через модернизацию основных фондов, техническое перевооружение производства, вовлечь в отработку запасы бедных, а также некондиционных руд и продлить таким образом сроки существования действующих шахт. В результате проведенных исследований установлено, что горно-химические технологии могут быть использованы для разработки бедных и некондиционных руд месторождений и таким образом повысить их рентабельность. Кроме того, за счет привлечения в производство некондиционных руд сырьевая база добычи металлов на действующих шахтах может быть увеличена в 1,4–1,6 раза. Установлено, что эффективность различных вариантов технологии выщелачивания металла из руд определяется полнотой его извлечения. Накопленный в мировой практике опыт свидетельствует, что при прочих равных условиях, таких как характер минерализации, структура, пористость руды, коэффициент диффузии, температура, концентрация рабочих растворов и т.п., полнота выщелачивания непосредственно зависит от качества дробления руды и равномерности ее распределения по плотности в замагнированном состоянии. Доказана возможность выщелачивания металла из рудных месторождений и установлена зависимость извлечения металла от среднего линейного размера раздробленной взрывом рудной массы [33, 34].

Перспективные исследования

Для обеспечения охраны гидрогеологической среды необходимо осуществлять заиливание глинистым раствором днища камеры по сбору продуктивных растворов, а также сооружать полуактивные водопроницаемые химически активные барьеры (ВХАБ) и применять биологические технологии при ПБВ. Основными преимуществами использования железоксидных композитов на основе природных глинистых минералов для очистки воды от загрязнения соединениями урана являются их экологичность, дешевизна, доступность и технологичность. Это должно обеспечивать снижение степени загрязненности металлами грунтовых и поверхностных вод, почв и отложений, включая главный Мичуринский разлом (г. Кропив-

ницкий, Украина). Необходимо также продолжить исследования, направленные на разработку таких технологий, которые удовлетворяли бы как экономическим, так и экологическим требованиям [35, 36].

Заключение

На основании полученных научных и практических результатов при комбинированном выщелачивании металлов из забалансовых и некондиционных руд для их последующего обогащения на гидрометаллургическом заводе авторами сделаны следующие выводы.

1. Отмечено, что за время опытно-промышленного эксперимента выщелачивания металлов из руд эксплуатационного блока 5–86 Мичуринского месторождения (Украина) наблюдение осуществлялось на трех горизонтах: 210, 225 и 280 м. В процессе эксперимента величина показателя рН воды соответствовала нейтральному значению 6,5–7,5 и только в 5 случаях его значения составили 1,5–2,0. Это объясняется прорывами трубопроводов, износом запорной арматуры. Ореол растекания технологических растворов был локальным и нейтрализован известковым молоком.

2. На основании экологического мониторинга и результатов анализа усредненное значение концентрации урана составляло: горизонт 210 м – 3,6 мг/л; горизонт 225 м – 3,58 мг/л; горизонт 280 м – 0,91 мг/л. Загрязнения подземных шахтных вод не обнаружено. Уровень аэрозолей серной кислоты и продуктов распада радона не превышал значений предельно-допустимой концентрации.

3. Рекомендовано для нейтрализации и промывки отработанной рудной массы обрабатывать ее раствором извести и шахтной водой через скважины для подачи выщелачивающих растворов (оросительная система). Охрану гидрогеологической среды осуществлять путем заиливания глинистым раствором днища камеры по сбору продуктивных растворов. Организовать мониторинг подземных вод через наблюдательные скважины, пробуренные в днище эксплуатационного блока и к контактам с рудным телом, а также зонами трещиноватости и гидрогеологического разрыва пород.

4. Показано, что природное выщелачивание металлов из рудного сырья является следствием недостаточного уровня применяемых технологий разработки и может быть минимизировано. Это обеспечит повышение экономической эффективности, рациональное использование недр, охрану гидрогеологической и окружающей среды, а также увеличит сырьевую базу добычи металлов в 1,4–1,6 раза.

Список литературы

1. Мосинец В.Н., Лобанов Д.П., Тедеев М.Н. и др. *Строительство и эксплуатация рудников подземного выщелачивания*. Монография. Под общ. ред. В.Н. Мосинца. М.: Недра; 1987. 304 с.
2. Чернов А.П. (ред.). *Добыча и переработка урановых руд в Украине*. Киев: АДЕФ–Украина; 2001. 238 с.
3. Ляшенко В.И., Голик В.И., Козырев Е.Н. Комбинированные технологии добычи полезных ископаемых с подземным выщелачиванием. *Горный журнал*. 2008;(12):37–40.
4. Дзапаров В.Х. Угроза безопасности жизнедеятельности региона РСО–Алания. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2009;(3):75–76. URL: <http://vestnik.magtu.ru/content/%D0%92%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20>



[%D0%9C%D0%93%D0%A2%D0%A3%20%D0%B7%D0%B0%202009%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4,%20%D0%9D%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%80%203.pdf](#)

5. Аренс В.Ж., Бабичев Н.И., Башкатов А.Д. и др. *Скважинная гидродобыча полезных ископаемых*. 2-е изд. М.: Горная книга; 2011. 295 с.

6. Ляшенко В.И., Кислый П.А., Дятчин В.З. Радиометрическая предконцентрация урановых руд. *Обогащение руд*. 2015;(1):3–9.

7. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Голик В.И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах. *Горные науки и технологии*. 2020;5(2):104–118. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118>

8. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap leaching technology – current state, innovations, and future directions: a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016;37(2):73–119. <https://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115990>

9. Oxley A., Smith M.E., Caceres O. Why heap leach nickel laterites. *Minerals Engineering*. 2016;88:53–60. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.09.018>

10. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production. *Waste Management*. 2017;61:40–57. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>

11. Li J., Li D., Xu Z., Liao C., Liu Y., Zhong B. Selective leaching of valuable metals from laterite nickel ore with ammonium chloride/hydrochloric acid solution. *Journal of Cleaner Production*. 2018;179:24–30. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.085>

12. Габараев О.З., Дмитрак Ю.В., Дребенштедт К., Савелков В.И. Закономерности взаимодействия разрушенных геоматериалов и рудовмещающего массива при отработке подработанных вкрапленных руд. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2017;9(4):406–413. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2017-9-4-406-413>

13. Комащенко В.И. Эколого-экономическая целесообразность утилизации горнопромышленных отходов с целью их переработки. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2015;(4):23–30. URL: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/file/tsu_izv_earth_science_2015_04.pdf

14. Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maysuradze M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory. *International Journal of GEOMATE*. 2016;10(1):1693–1697. URL: <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/2012/1888>

15. Карамушка В.П., Камнев Е.Н., Кузин Р.З. *Рекультивация объектов добычи и переработки урановых руд*. М.: Издательство «Горная книга»; 2014. 183 с.

16. Kachurin N., Komashchenko V., Morkun V. Environmental monitoring atmosphere of mining territories. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015;(6):595–597. URL: <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/MMI-6/083-Nikolai-Kachurin.pdf>

17. Святецкий В.С., Солодов И.Н. Стратегия технологического развития уранодобывающей отрасли России. *Горный журнал*. 2015;(7):68–77. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.07.10>

18. Каплунов Д.Р., Юков В.А., Лавенков В.С. Сопоставление блокового и скважинного выщелачивания для подземной добычи медных руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(3):7–14. URL: https://giab-online.ru/files/Data/2017/3/7_14_3_2017.pdf

19. Морозов А.А., Яковлев М.В. Вовлечение в переработку забалансовых урановых руд, образовавшихся при освоении месторождений Стрельцовского рудного поля. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;(12):174–181. URL: https://giab-online.ru/files/Data/2016/12/174_181_12_2016.pdf

20. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Методологические аспекты проектирования системы управления минерально-сырьевыми потоками в полном цикле комплексного освоения рудных месторождений. *Рациональное освоение недр*. 2016;(3):36–41.

21. Chen T., Lei C., Yan B., Xiao X. Metal recovery from the copper sulfide tailing with leaching and fractional precipitation technology. *Hydrometallurgy*. 2014;147–148:178–182. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.05.018>

22. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap leaching technology – Current state, innovations, and future directions: a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016;37(2):73–119. <https://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115990>

23. Копбаева М.П., Панова Е.Н., Принзин Н.А., Карманов Е.М. Оптимизация технологии пероксидного осаждения урана. *Горный журнал*. 2016;(5):90–94. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.05.13>

24. Солодов И.Н., Камнев Е.Н. (ред.). *Геотехнология урана (российский опыт)*. М.: КДУ; 2017. 576 с.

25. Святецкий В.С., Полонянкина С.В., Ермаков А.Г. Уранодобывающая отрасль России: состояние и перспективы развития. *Разведка и охрана недр*. 2017;(11):22–26.

26. Машковцев Г.А., Мигута А.К., Щеточкин В.Н. Сырьевая база урана. Проблемы развития и освоения. Минеральные ресурсы России. *Экономика и управление*. 2017;(3):67–78.



27. Балихин А.В. Минерально-сырьевая база урана: современное состояние и перспективы развития. *Обзор. Комплексное использование минерального сырья*. 2019;(1):36–50. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.05>
28. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*. 2015;157:306–324. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.08.022>
29. Aben E., Markenbayev Zh., Khairullaev N., et al. Study of change in the leaching solution activity after treatment with a cavitator. *Mining of Mineral Deposits*. 2019;13(4):114–120. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.114>
30. Malanchuk Z., Korniienko V., Malanchuk Ye., et al. Modeling the formation of high metal concentration zones in man-made deposits. *Mining of Mineral Deposits*. 2018;12(2):76–84. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.076>
31. Stupnik M., Kalinichenko O., Kalinichenko V., et al. Choice and substantiation of stable crown shapes in deep-level iron ore mining. *Mining of Mineral Deposits*. 2018;12(4):56–62. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.056>
32. Овсейчук В.А., Зозуля А.М. Совершенствование процесса блочного подземного выщелачивания в условиях Стрельцовского рудного поля. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(3–1):26–33. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_31_0_26
33. Kovalchuk I., Tobilko V., Kholodko Yu., Zahorodniuk N., Kornilovych B. Purification of mineralized waters from U(VI) compounds using bentonite/iron oxide composites. *Technology audit and production reserves*. 2020;3(3):12–18. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.205146>
34. Антонинова Н.Ю., Собенин А.В., Шубина Л.А. Оценка возможности использования промышленных отходов при формировании геохимических барьеров. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(12):78–88. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-78-88>
35. Камнев Е.Н., Карамушка В.П., Селезнев А.В. и др. Экологические проблемы и их решение при закрытии урановых производств (на примере России, СНГ и Германии). *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(5):26–39. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-5-0-26-39>
36. Подрезов Д.Р. Задачи совершенствования управления и повышения эффективности функционирования технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания урана. *Горные науки и технологии*. 2020;5(2):131–153. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-131-153>

References

1. Mosinets V.N., Lobanov D.P., Tedeev M.N. et al. *Construction and operation of ISL mines*. Monograph. Under the general editorship of Mosinets V. N. Moscow: Nedra Publ.; 1987. 304 p. (In Russ.)
2. Chernov A.P. (ed.) *Mining and processing of uranium ores in Ukraine*. Kyiv: Adef-Ukraine Publ.; 2001. 238 p. (In Russ.)
3. Lyashenko V.I., Golik V.I., Kozyrev E.N. Integrated mining methods with underground leaching. *Gornyi Zhurnal*. 2008;(12):37–40 (In Russ.)
4. Dzaparov V.Kh. Life threat of RSO-Alaniya reion. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2009;(3):75–76. (In Russ.). URL: <http://vestnik.magtu.ru/content/%D0%92%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%9C%D0%93%D0%A2%D0%A3%20%D0%B7%D0%B0%202009%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4,%20%D0%9D%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%80%203.pdf>
5. Ahrens V.Zh., Babichev N.I., Bashkatov A.D. et al. *In situ leaching*. 2nd ed. Moscow: Gornaya Kniga Publ.; 2011. 295 p. (In Russ.)
6. Lyashenko V.I., Kisly P.A., Djatchin V.Z. Radiometrical preconcentration of uranium ores. *Obogashchenie Rud*. 2015;(1):3–9 (In Russ.)
7. Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Golik V.I. Friendly and resource-saving methods of underground ore mining in disturbed rock masses. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(2):104–118. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118>
8. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap leaching technology – current state, innovations, and future directions: a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016;37(2):73–119. <https://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115990>
9. Oxley A., Smith M.E., Caceres O. Why heap leach nickel laterites. *Minerals Engineering*. 2016;88:53–60. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.09.018>
10. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production. *Waste Management*. 2017;61:40–57. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>
11. Li J., Li D., Xu Z., Liao C., Liu Y., Zhong B. Selective leaching of valuable metals from laterite nickel ore with ammonium chloride/hydrochloric acid solution. *Journal of Cleaner Production*. 2018;179:24–30. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.085>



12. Gabaraev O.Z., Dmitrak Yu.V., Drebenshtedt K., Savelkov V.I. Regularities of interaction of destroyed geo-materials and ore-bearing massif in the processing of processed deposited ore. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2017;9(4):406–413. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2017-9-4-406-413>
13. Komashchenko V.I. Environmental-economical expediency of utilizing mining-industrial wastes for their converting. *Izvestija Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2015;(4):23–30. (In Russ.). URL: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/file/tsu_izv_earth_science_2015_04.pdf
14. Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maysuradze M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory. *International Journal of GEOMATE*. 2016;10(1):1693–1697. URL: <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/2012/1888>
15. Karamushka V.P., Kamnev E.N., Kuzin R.Z. *Reclamation of uranium ore mining and processing facilities*. Moscow: Gornaya Kniga Publishing House; 2014. 183 p. (In Russ.)
16. Kachurin N., Komashchenko V., Morkun V. Environmental monitoring atmosphere of mining territories. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015;(6):595–597. URL: <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/MMI-6/083-Nikolai-Kachurin.pdf>
17. Svyatetsky V.S., Solodov I.N. Technological advancement strategy of uranium mining industry in Russia. *Gornyi Zhurnal*. 2015;(7):68–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.07.10>
18. Kaplunov D.R., Yukov V.A., Lavenkov V.S. The underground copper block and boreholes leaching methods comparison. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(3):7–14. URL: https://giab-online.ru/files/Data/2017/3/7_14_3_2017.pdf
19. Morozov A.A., Yakovlev M.V. Off-balance uranium ores formed at development of the Streltsovsky ore field involvement in processing. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2016;(12):174–181. (In Russ.). URL: https://giab-online.ru/files/Data/2016/12/174_181_12_2016.pdf
20. Rylnikova M.V., Radchenko D.N. Methodological aspects of designing a system of mineral flow management in the full cycle of integrated development of ore deposits. *Ratsionalnoe Osvoenie Nedr*. 2016;(3):36–41 (In Russ.)
21. Chen T., Lei C., Yan B., Xiao X. Metal recovery from the copper sulfide tailing with leaching and fractional precipitation technology. *Hydrometallurgy*. 2014;147–148:178–182. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.05.018>
22. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap leaching technology – current state, innovations, and future directions: a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016;37(2):73–119. <https://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115990>
23. Kopbaeva M.P., Panova E.N., Prinzin N.A., Karmanov E.M. Optimization of uranium peroxide precipitation. *Gornyi Zhurnal*. 2016;(5):90–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.05.13>
24. Solodov I.N., Kamnev E.N. (eds). *Uranium geotechnology (Russian experience)*. Moscow: KDU Publ.; 2017. 576 p. (In Russ.)
25. Svyatetskiy V.S., Polonyankina S.V., Ermakov A.G. Uranium-mining industry of Russia: the state and prospects of development. *Razvedka i Okhrana Nedr*. 2017;(11):22–26. (In Russ.)
26. Mashkovtsev G.A., Miguta A.K., Shchetochkin V.N. Uranium resource base. Problems of exploration and development. *Mineral Recourses of Russia. Economics and Management*. 2017;(3):67–78. (In Russ.)
27. Balikhin A.V. Uranium mineral-resources: the current state and perspectives for development. Review. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a*. 2019;(1):36–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.31643/2019/6445.05>
28. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*. 2015;157:306–324. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.08.022>
29. Aben E., Markenbayev Zh., Khairullaev N., et al. Study of change in the leaching solution activity after treatment with a cavitator. *Mining of Mineral Deposits*. 2019;13(4):114–120. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.114>
30. Malanchuk Z., Korniienko V., Malanchuk Ye., et al. Modeling the formation of high metal concentration zones in man-made deposits. *Mining of Mineral Deposits*. 2018;12(2):76–84. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.076>
31. Stupnik M., Kalinichenko O., Kalinichenko V., et al. Choice and substantiation of stable crown shapes in deep-level iron ore mining. *Mining of Mineral Deposits*. 2018;12(4):56–62. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.056>
32. Ovseychuk V.A., Zozulia A.M. Improvement of in-situ leaching: a case-study of the Streltsovo ore field. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(3–1):26–33. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_31_0_26
33. Kovalchuk I., Tobilko V., Kholodko Yu., Zahorodniuk N., Kornilovych B. Purification of mineralized waters from U(VI) compounds using bentonite/iron oxide composites. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020;3(3):12–18. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.205146>



34. Antoninova N. Yu., Sobenin A. V., Shubina L. A. Assessment of usability of industrial waste in construction of geochemical barriers. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(12):78–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-78-88>

35. Kamnev E. N., Karamushka V. P., Seleznev A. V., et al. Ecology of uranium mine closure: problems and solutions (in terms of Russia, CIS Countries and Germany). *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(5):26–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-5-0-26-39>

36. Podrezov D. R. Issues of improving control and increasing efficiency of production blocks at an ISL uranium mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(2):131–153. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-131-153>

Информация об авторах

Василий Иванович Ляшенко – кандидат технических наук, ст. науч. сотрудник, Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии, г. Желтые Воды, Украина; ORCID [0000-0001-8361-4179](https://orcid.org/0000-0001-8361-4179), Scopus ID [8915855500](https://scopus.com/authorid/8915855500); e-mail vilyashenko2017@gmail.com

Владимир Иванович Голик – доктор технических наук, профессор кафедры «Горное дело», Северо-Кавказский горно-металлургический институт, г. Владикавказ, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-1181-8452](https://orcid.org/0000-0002-1181-8452), Scopus ID [6602135324](https://scopus.com/authorid/6602135324); e-mail v.i.golik@mail.ru

Роман Владимирович Клюев – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника низких температур им. П.Л. Капицы», Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-3777-7203](https://orcid.org/0000-0003-3777-7203), Scopus ID [57194206632](https://scopus.com/authorid/57194206632); e-mail kluev-roman@rambler.ru

Information about the authors

Vasiliy I. Lyashenko – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Fellow, Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology, Zholti Vody, Ukraine; ORCID [0000-0001-8361-4179](https://orcid.org/0000-0001-8361-4179), Scopus ID [8915855500](https://scopus.com/authorid/8915855500); e-mail vilyashenko2017@gmail.com

Vladimir I. Golik – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Mining Department, North Caucasian Mining and Metallurgical Institute, Vladikavkaz, Russian Federation; ORCID [0000-0002-1181-8452](https://orcid.org/0000-0002-1181-8452), Scopus ID [6602135324](https://scopus.com/authorid/6602135324); e-mail v.i.golik@mail.ru

Roman V. Klyuev – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of the Technique of Low Temperature name P.L. Kapitza, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-3777-7203](https://orcid.org/0000-0003-3777-7203), Scopus ID [57194206632](https://scopus.com/authorid/57194206632); e-mail kluev-roman@rambler.ru

Поступила в редакцию	21.11.2021	Received	21.11.2021
Поступила после рецензирования	28.12.2021	Revised	28.12.2021
Принята к публикации	01.02.2022	Accepted	01.02.2022