

## СТАТЬИ

УДК 550.72

**ОБЗОР ЗАПАТЕНТОВАННЫХ СПОСОБОВ СКВАЖИННОГО, ПОДЗЕМНОГО БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ СУЛЬФИДНЫХ РУД****Иодис В.А.***ФГБУН Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, e-mail: iodisva@mail.ru*

В работе представлен обзор патентов базы данных российского патентного ведомства способов скважинного, подземного биовыщелачивания – способа выщелачивания сульфидных руд и концентратов НИиПИ «Унипромед», способа бактериального выщелачивания цветных металлов из руд ИГД АН Казахской ССР, способа бактериального выщелачивания руды МГИ им. Серго Орджоникидзе, способа подземного выщелачивания сульфидных медьсодержащих полиметаллических руд ЗАО «Интегра», способа комбинированной разработки руд ЧитГУ, способа получения окислителя для выщелачивания металлов из сульфидного минерального сырья НИТУ «МИСиС», способа подземного выщелачивания металлов из сульфидсодержащего минерального сырья с выявлением их преимуществ и недостатков, а также предложение наиболее оптимального способа. В предлагаемом способе для предварительной промывки подают водный раствор серной кислоты в сульфидную руду, затем насыщают руду активной биомассой микроорганизмов. В дальнейшем предполагается чередование подачи  $H_2SO_4$  и бактериального раствора. Для снижения эксплуатационных затрат в руду подается подкисленный раствор без металлов, полученный после извлечения ценных металлов. Для поддержания жизнедеятельности бактерий, участвующих в окислительных процессах, предлагаемый способ включает прерывистую подачу кислорода воздуха. Перед процессом биовыщелачивания рудное тело необходимо вскрыть, пробурить с получением скважин, взорвать, пробурить заезды и скважины для аэрации и слива раствора на извлечение.

**Ключевые слова:** скважинное, подземное биовыщелачивание, сульфидные руды, металлы, бактериальный раствор, медь, цинк, патент

**OVERVIEW OF PATENTED METHODS FOR WELL, UNDERGROUND BIOLOGICAL LEACHING OF SULFIDE ORE****Iodis V.A.***Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, e-mail: iodisva@mail.ru*

The paper presents an overview of the patents of the database of the Russian Patent Office of the methods of borehole, underground bioleaching – the method of leaching sulfide ores and concentrates of the RIPI «Unipromed», the method of bacterial leaching of non-ferrous metals from the ores of the MI Academy of Sciences of the Kazakh SSR, the method of bacterial leaching of ore MSI im. Sergo Ordzhonikidze, method of underground leaching of sulfide copper-containing polymetallic ores of CJSC «Integra», method of combined mining of ores of ChitSU, a method of obtaining an oxidizer for leaching metals from sulfide mineral raw materials of RTU «MISI-S», a method of underground leaching of metals from sulfide-containing mineral raw materials with the identification of their advantages and disadvantages, as well as proposing the most optimal method. In the proposed method for preliminary washing, an aqueous solution of sulfuric acid is fed into the sulfide ore, then the ore is saturated with active biomass of microorganisms. In the future, it is assumed that the supply of  $H_2SO_4$  and the bacterial solution will alternate. To reduce operating costs, an acidified solution without metals, obtained after the extraction of valuable metals, is fed into the ore. To maintain the vital activity of bacteria participating in oxidative processes, the proposed method includes an intermittent supply of air oxygen. Before the bioleaching process, the ore body must be opened, drilled to obtain boreholes, blasted, and drilled inlets and boreholes for aeration and drainage of the solution for extraction.

**Keywords:** well, underground bioleaching, sulfide ores, metals, bacterial solution, copper, zinc, patent

С целью обеспечения всевозрастающих потребностей в металлах интенсивно применяется разработка руд, залегающих на больших глубинах, эксплуатация «бедных», заброшенных (забалансовых) и небольших месторождений, где традиционное производство нерентабельно, переработка отходов производств. При этом возникает ряд трудностей – обеспечение экономической рентабельности добычи и переработки, безопасности горных работ, сохранение окружающей среды [1–3].

Одним из способов решения перечисленных выше трудностей является

геобиотехнологический способ добычи металлов – биовыщелачивание и один из его методов – скважинное, подземное биовыщелачивание сульфидных руд, который позволяет сделать экономически рентабельной переработку «бедных» руд, обеспечить безопасность горных работ, существенно повысить степень извлечения металлов из сульфидных руд при относительно низких эксплуатационных и капитальных затратах, оказать минимальное воздействие на окружающую среду [4–6].

Способ основывается на том, что раствор, содержащий водный раствор  $H_2SO_4$

с добавлением солей трехвалентного железа и микроорганизмы, закачивается в скважины или трещины в горной породе и проходит сквозь него. Процесс требует проницаемости рудного тела, постоянное и полное насыщение выщелачивающего раствора кислородом. После того, как металлы переходят в раствор, последний собирают и откачивают насосом в установку, где осуществляют их непосредственное извлечение и концентрирование [7–9].

При правильном и грамотном регулировании параметров процесса (рН от 1,0 до 3,0, температуре от 5 до 80 °С, окислительно-восстановительном потенциале 600–750 мВ, концентрация растворенного в растворе кислорода и т.д.) можно достичь существенного снижения его продолжительности.

Применение скважинного, подземного биовыщелачивания даст возможность использовать «бедные» сульфидные руды, обеспечить более полное использование минерального сырья, обеспечить простоту, упрощение технологического процесса [10–12].

Целью данной работы является обзор результатов российских патентных исследований способов скважинного, подземного биовыщелачивания сульфидных руд с выбором наиболее оптимального способа выщелачивания.

#### Материалы и методы исследования

Для достижения цели работы были решены следующие задачи: анализ способов скважинного, подземного биовыщелачивания с выявлением их преимуществ и недостатков; предложение наиболее оптимального способа подземного биовыщелачивания металлов. При решении указанных задач применялись методы обобщения, систематизации и сравнительного анализа.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Первое авторское свидетельство к изобретению, которое было доступно авто-

ру данной работы, для метода подземного биовыщелачивания сульфидных руд принадлежит НИиПИ «Унипромедь» (1983 г.). Способ заключался в закачке биовыщелачивающего раствора и прерывистой принудительной подаче воздуха в скважины или трещины в горной породе. Подача воздуха осуществлялась в течение 60–120 мин, через каждые 60–180 мин, в течение которых растворенный в растворе O<sub>2</sub> поддерживал жизнедеятельность микроорганизмов и участвовал в окислительных процессах. По мере снижения содержания растворенного O<sub>2</sub> подача воздуха возобновлялась. Результаты экспериментов изобретения НИиПИ «Унипромедь» представлены зависимостью извлечения Cu и Zn от способа подачи воздуха, представленной в табл. 1, откуда можно сделать вывод о преимуществе прерывисто-принудительной подачи воздуха, при снижении эксплуатационных затрат на обеспечение O<sub>2</sub> раствора [13].

Уже в 1984 г. ИГД АН Казахской ССР патентует способ биовыщелачивания цветных металлов [14]. В трещины рудного тела подают воду, а затем водный раствор H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> для предварительной промывки. Далее руду насыщают бактериальным раствором для окисления сульфидных минералов и закисного железа. Через некоторый промежуток времени руда промывается подкисленным раствором без Cu и Zn, а затем опять бактериальным. Из полученного в процессе промывки раствора извлекают металлы. Раствор без Cu и Zn подкисляют и направляют опять на промывку руды. Результаты экспериментов при осуществлении способа ИГД АН Казахской ССР представлены в табл. 2. Схема технологического процесса представлена на рис. 1.

К преимуществам изобретения [14] можно отнести достаточную скорость извлечения металлов, что позволяет снизить продолжительность процесса, а к недостаткам – сравнительно небольшую степень извлечения.

Таблица 1

Зависимость среднемесячного извлечения Cu и Zn от способа подачи воздуха в рудное тело [13]

Показатели (среднемесячное извлечение), %	Способ подачи воздуха		
	Естественная	Постоянно-принудительная	Прерывисто-принудительная
Cu	0,45	2,08	4,13
Zn	0,8	2,38	3,40

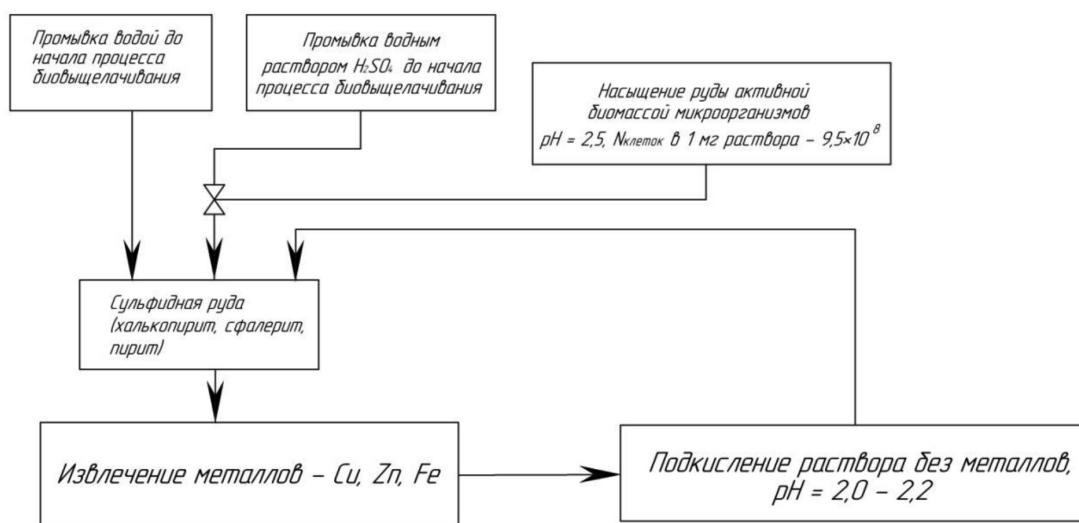


Рис. 1. Схема технологического процесса способа [14]

Таблица 2

Показатели скорости биовыщелачивания и извлечения Cu и Zn в зависимости от способа подачи бактериального и подкисленного растворов [14]

Способ подачи растворов	Скорость процесса, г/сут	Процент извлечения
Поочередная подача бактериального и подкисленного растворов	0,069 (Cu)	7,0 (Cu)
	0,064 (Zn)	14,2 (Zn)
Постоянная подача бактериального и подкисленного растворов	0,041 (Cu)	3,3 (Cu)
	0,047 (Zn)	8,3 (Zn)

Известен способ биовыщелачивания руды, разработанный Московским геологоразведочным институтом им. Серго Орджоникидзе [15]. В изобретении месторождение Cu (0,2%) обуривали с получением сетки скважин, в которые для повышения пористости и проницаемости руды устанавливали заряды и взрывали. В образовавшихся блоках изобретением предусматривается подача питательного раствора и раствора  $H_2SO_4$ , содержащего *Thiobacillus ferrooxidans*. После заполнения блока раствором последний выдерживали в течение нескольких десятков суток (рис. 2) и начинали выпускать продуктивный раствор до момента снижения концентрации Cu в нем, а после падения концентрации в блок начинали подавать раствор  $H_2SO_4$  повышенной концентрации, который губительно действует на микроорганизмы, потерявшие способность к окислительно-восстановительным процессам. Подачу раствора  $H_2SO_4$  повышенной концентрации продолжали в течение 36–48 ч, с одновременным выпуском продуктивного раствора. После

этого для активации подавленных активных клеток подавали питательный раствор с начальной концентрацией реагента.

Способ [15] повышает степень извлечения Cu, эффективен, однако имеют место высокие эксплуатационные затраты, вследствие повышенного расхода  $H_2SO_4$ , кроме того, крупность руды должна быть минимальна, а при подземном выщелачивании скальных руд наличие в отбитой руде более 15–20% класса 150–200 мм может в ряде случаев резко ухудшить качественные показатели добычи и повысить себестоимость готовой продукции [16].

ЗАО «Интегра» в 1999 г. предложила способ подземного выщелачивания сульфидных полиметаллических руд [17]. Процесс проводится в зонах обрушения горной породы, в трещиноватых зонах затопленных рудников. В изобретении окисление ионов железа (II) в растворе проводят с помощью микроорганизмов (*Thiobacillus ferrooxidans*) при аэрации или в присутствии дисульфида железа, при наложении акустических колебаний излучателями.

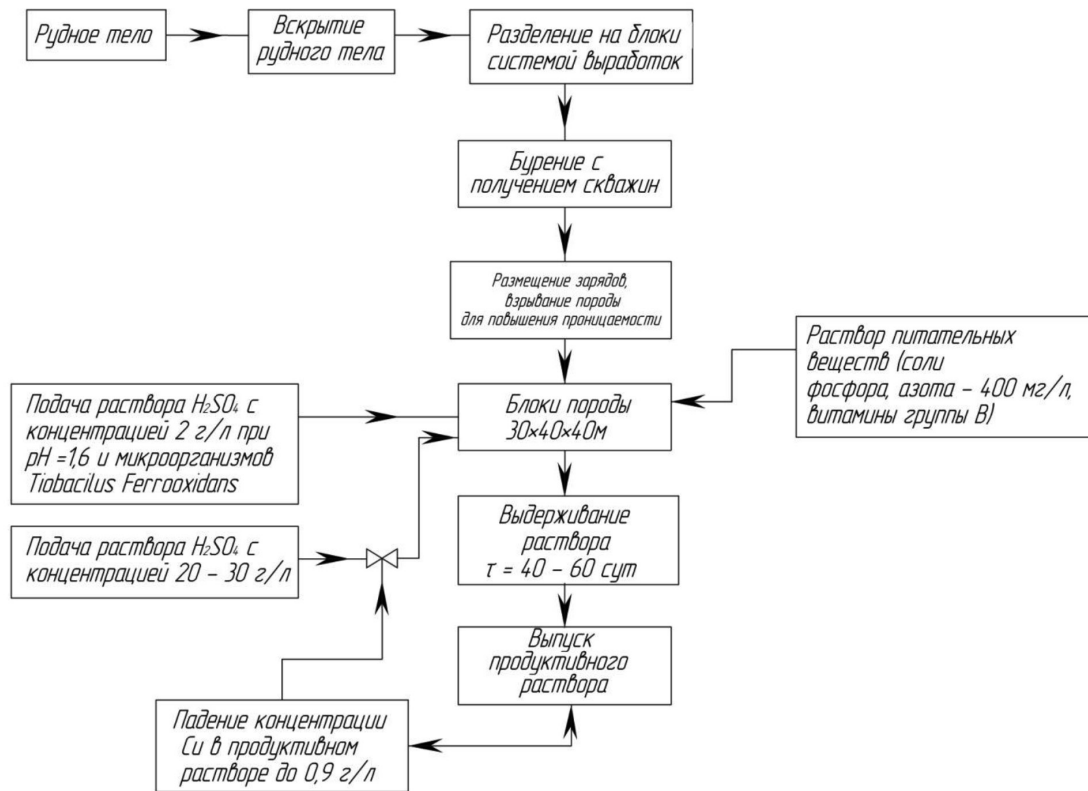


Рис. 2. Схема технологического процесса способа [15]

Для обеспечения достаточной скорости процесса, сравнительно небольшой его продолжительности, высокого процента извлечения авторы изобретения рекомендуют поддерживать концентрацию ионов железа (II) в пределах от 0,005 до 0,015 кг/л. В изобретении показано, что при окислительно-восстановительном потенциале 0,4–0,45 В, концентрации 0,005 кг/л  $H_2SO_4$ , 0,01 кг/л  $Fe_2(SO_4)_3$  степень извлечения после 20 дней процесса составит 99%. Для обеспечения нормальной жизнедеятельности микроорганизмов необходимо поддерживать водородный показатель на уровне от 2 до 3,5, а  $t = 5–25\text{ }^\circ\text{C}$ . Эксперименты показали, что для окисления микроорганизмами ионов железа (II) необходима концентрация  $O_2$  на уровне от 0,013 до 0,015 г/л, при их числе в  $1\text{ см}^3$  – до  $10^8$ .

Изобретение [17] позволяет достичь 99% извлечения меди, при сравнительно низкой продолжительности процесса, однако в описании способа не приводятся параметры процесса наложения акустических колебаний.

Изобретение ЧитГУ [18] заключается в одновременном получении ценных ме-

таллов из «богатых» и «бедных» руд. Способ предусматривает извлечение «богатой» руды и выщелачивание оставшейся ее части – «бедной» руды. Извлечение «богатой» руды проходит по схеме «камера-целик», а в образовавшиеся камеры закладывают твердеющую смесь. В образующее после выемки целиков пространство закладывается «бедная» руда подготовительной выработки. Биовыщелачивание Cu и Zn из «бедной» руды подготовительной выработки происходит окисленными  $H_2SO_4$  (водородный показатель равен 3) шахтными водами, насыщенными  $O_2$ , в которые добавляют штаммы микроорганизмов на начальном этапе. Далее для выщелачивания оставшихся ценных металлов в руду добавляют комплексобразующие и окислительные растворы.

К достоинствам данного изобретения относятся: существенное снижение продолжительности технологического процесса, снижение затрат на приготовление выщелачивающих растворов, снижение потерь добываемых металлов, увеличение экологичности производства.

В 2018 г. НИТУ «МИСиС» запатентовал способ получения окислителя для выщела-

чивания металлов из сульфидных руд [19], который относится к получению окислителя сульфидов из сернокислых растворов железа (II) с использованием микроорганизмов и может быть использован для растворения сульфидов Cu, Ni, Zn, Co, As, Fe, а также выщелачивания металлов из сульфидных руд подземным и скважинным способами. В способе ацидофильные микроорганизмы иммобилизовали на древесной стружке с цеолитом, керамзите при циркуляции через слои инокулята с  $pH = 1,5-2,4$ , концентрацией  $Fe \approx 0,012 \text{ кг/дм}^3$  и аэрации воздухом. Далее получали окислитель из сернокислого раствора  $Fe^{2+}$  с  $pH \approx 2,6$ , концентрацией  $Fe \approx 0,03 \text{ кг/дм}^3$ .

К недостаткам данного способа относятся необходимость выщелачивания крупнокусковых руд, подготавливаемых к выщелачиванию взрывным способом, а это ухудшает качественные показатели добычи и увеличивает стоимость готовой продукции [16].

Одно из последних отечественных изобретений (2021 г.) по методам подземного выщелачивания сульфидсодержащего сырья принадлежит Д.Н. Радченко [20]. Способ подземного выщелачивания с низкотемпературным окислением предусматривает отгрузку руды в реактор 2 (рис. 3), бурение систем скважин 5 в днище реактора 2 для аэрации массива кислорода воздуха и сбора избытка растворов. В верхнюю часть реак-

тора 2 подается в ограниченном капельном режиме выщелачивающий раствор, содержащий штаммы микроорганизмов. Авторы изобретения отмечают, что периодически может осуществляться подогрев растворов, промывка рудной массы, подача растворов для растворения пассивирующих пленок, подача горячих и иных газов через скважины 5. Процесс биовыщелачивания проходит при значении водородного показателя равного 2, предшествуя предварительному низкотемпературному окислению продолжительностью 20 сут.

К недостаткам можно отнести повышенные капитальные затраты подготовительных операций процесса биовыщелачивания.

### Заключение

В результате патентного поиска и анализа способов скважинного, подземного биовыщелачивания были выявлены их преимущества и недостатки.

Анализ отечественных изобретений показал, что оптимальный способ скважинного, подземного биовыщелачивания должен предусматривать подачу водного раствора серной кислоты в сульфидную руду для осуществления предварительной промывки, затем насыщение руды активной биомассой микроорганизмов, при этом в дальнейшем чередование подачи  $H_2SO_4$  и бактериального раствора.

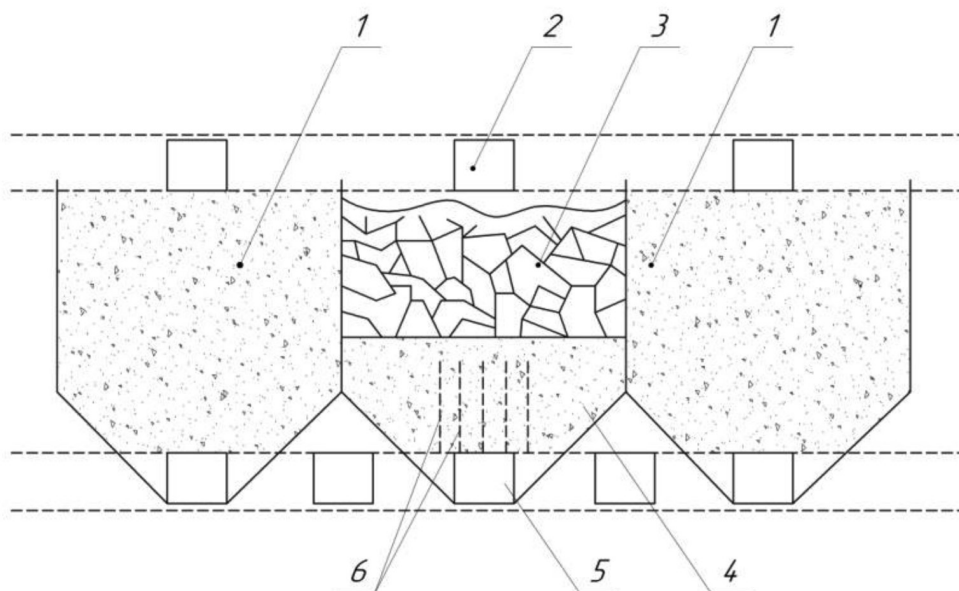


Рис. 3. Схема подземного выщелачивания с низкотемпературным окислением [20]:  
1 – стенки; 2 – заезды; 3 – выщелачивание; 4 – реактор;  
5 – заезд нижележащего горизонта; 6 – система скважин

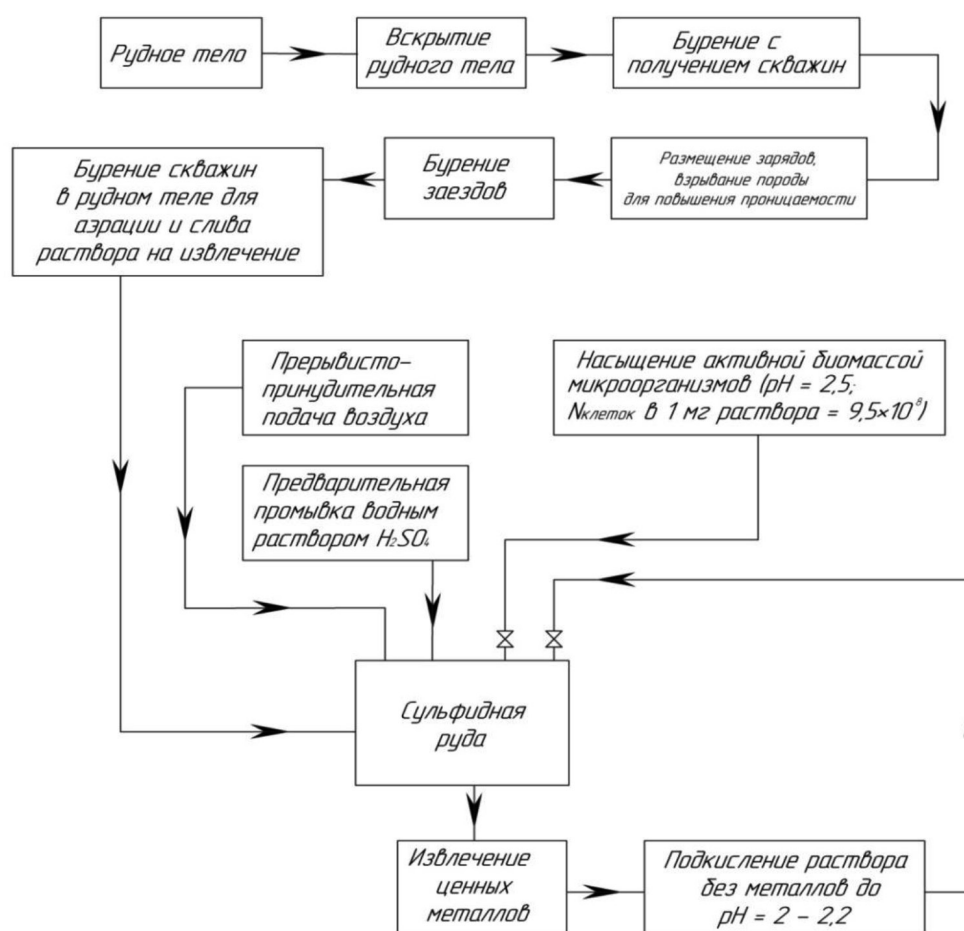


Рис. 4. Схема технологического процесса предлагаемого способа

Для снижения эксплуатационных затрат в руду подается подкисленный раствор без металлов, полученный после извлечения ценных металлов, а для поддержания жизнедеятельности бактерий, участвующих в окислительных процессах, способ включает прерывистую подачу кислорода воздуха. Перед процессом биовыщелачивания рудное тело вскрывается, бурится с получением скважин, взрывается, бурятся заезды и скважины для аэрации и слива раствора на извлечение. Схема предлагаемого способа представлена на рис. 4.

#### Список литературы

1. Мусихин В.О. Методы интенсификации процессов бактериально-химического выщелачивания воздействием ультразвукового излучения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 63. С. 351–355.
2. Киореску А.В. Механизмы воздействия микроволнового излучения на процессы выщелачивания минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 63. С. 335–339.

3. Иодис В.А. Способы подземного биовыщелачивания сульфидных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 46. С. 104–111. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-46-104-111.
4. Хайнасова Т.С. О механизме биовыщелачивания сульфидных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 57. С. 242–248. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-57-242-248.
5. Хайнасова Т.С. Биовыщелачивание ключевых минералов сульфидных медно-никелевых руд (краткий обзор) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 46. С. 186–201. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-46-186-201.
6. Мусихин В.О., Киореску А.В. Сочетанное воздействие СВЧ-излучения и ультразвука на смешанную культуру хемолитотрофных аборигенных микроорганизмов Камчатской никеленосной провинции // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2018. № 6 (202). С. 159–165. DOI: 10.25808/08697698.2018.202.6.018.
7. Хайнасова Т.С., Левенец О.О. Бактериально-химическое выщелачивание как экологически безопасный способ переработки сульфидной кобальт-медно-никелевой руды // Разведка и охрана недр. 2015. № 1. С. 49–54.
8. Хайнасова Т.С. Бактериально-химические способы переработки руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018.

№ 12 (специализированный выпуск 57). С. 192–197. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-57-192-197.

9. Хайнасова Т.С., Левенец О.О., Балыков А.А. Бактериально-химические процессы переработки руд и их исследование в Камчатском крае // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 31. С. 223–234.

10. Хайнасова Т.С. Экологические аспекты распространения ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов, перспективных для биовыщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 57. С. 198–207. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-57-198–207.

11. Хайнасова Т.С. Факторы, влияющие на бактериально-химические процессы переработки сульфидных руд // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 47–54. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.47.

12. Киореску А.В. Способы интенсификации процессов выщелачивания воздействием микроволнового излучения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 63. С. 346–350.

13. А.с. 998549 СССР, МПК С 22 В 3/00. Способ выщелачивания сульфидных руд и концентратов / Халезов Б.Д., Смирных Л.В., Рыбаков Ю.С., Абакумов В.В., Уральский ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский и проектный институт медной промышленности «Унипромедь» 3344982/22 – 02; заявлено 12.10.81; опубл. 23.02.83, Бюл. 7. С. 2.

14. А.с. 943309 А СССР, МПК С 22 В 3/00; С 22 В 15/08. Способ бактериального выщелачивания цветных металлов из руд / Скрипниченко Л.Н., Илялетдинов А.Н., Институт горного дела АН Казахской ССР. 2993243/22 – 02; заявлено 08.10.80; опубл. 28.02.84, Бюл. 8. С. 3.

15. А.с. 1578322 А1 СССР, МПК Е 22 В 43/28. Способ бактериального выщелачивания руды / Секисов А.Г., Бударгин А.Ю., Хакулов В.А., Воробьев А.Е., Мусаев Н.А., Завьялов Л.А., Зверев Д.А. Московский геологоразведочный институт им. Серго Орджоникидзе. 4427646/23 – 03; заявлено 18.05.88; опубл. 15.07.90, Бюл. 26. С. 3.

16. Бубнов В.К., Голик В.И., Воробьев А.Е., Капканщиков А.М., Хадонов З.М., Поляцкий И.В., Руденко Н.К., Югай А.В., Габараев О.З., Чекушина Т.В. Актуальные вопросы добычи цветных, редких и благородных металлов. М.: Акмола, 1995. С. 601.

17. Канцель А.В., Лаверов Н.П., Нестеров Ю.В., Новосельцев В.В., Волькинштейн М.Я., Николайченков Ю.С., Хитрик М.С. Способ подземного выщелачивания сульфидных медьсодержащих полиметаллических руд // Патент РФ № 2124632, С1. Патентообладатель Закрытое акционерное общество «Интегра». 1999.

18. Секисов А.Г., Лавров А.Ю., Резник Ю.Н., Кудряшов Е.А., Зыков Н.В., Конарева Т.Г. Способ комбинированной разработки руд // Патент РФ № 2361077, С1. Патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Читинский государственный университет (ЧитГУ). 2009. Бюл. № 19.

19. Крылова Л.Н. Способ получения окислителя для выщелачивания металлов из сульфидного минерального сырья // Патент РФ № 2659502, С1. Патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». 2018. Бюл. № 19.

20. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н., Радченко И.Н., Радченко Я.А., Князькин Е.А., Гаджиева Л.А. Способ подземного выщелачивания металлов из сульфидсодержащего минерального сырья // Патент РФ № 2747275, С1. Патентообладатель Радченко Д.И. 2021. Бюл. № 13.