

# КАСКАДНАЯ РЕАКТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ РУД

Р. С. Вопилин, В. А. Иодис

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук»  
(НИГТЦ ДВО РАН), г.Петропавловск-Камчатский, Россия

**Аннотация:** В целях интенсификации процесса бактериально-химического выщелачивания руд проанализированы основные виды и конструктивные особенности реакторов, реакторных установок для осуществления данного процесса. Проанализированы существующие системы плавного регулирования потока пульпы, аэрации, термостатирования, контроля и автоматического регулирования параметров реакторов. На основании анализа их преимуществ и недостатков спроектирована и смонтирована каскадная реакторная установка проточного типа. Для установки разработана система регулирования параметров процесса выщелачивания – температуры, водородного показателя, смеси пульпы и бактериальной суспензии, частоты перемешивания смеси, система аэрации, термостатирования.

**Ключевые слова:** бактериально-химическое выщелачивание, рудная пульпа, бактериальная суспензия, реактор, реакторная установка

**Для цитирования:** Вопилин Р. С., Иодис В. А. Каскадная реакторная установка для бактериально-химического выщелачивания руд. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 49-54. [https://doi.org/10.56195/20793332\\_2024\\_5\\_49\\_54](https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_49_54).

## CASCADE REACTOR PLANT FOR BACTERIAL-CHEMICAL LEACHING ORE

R. S. Vopilin, V. A. Iodis

Scientific Research Geotechnological Center Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (NIGTC FEB RAS),  
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

**Abstract:** In order to intensify the kinetics of the bacterial-chemical leaching process ore, the main types and design features of reactors and reactor installations for implementing this process were analyzed. The existing systems for smooth regulation of pulp flow, aeration, thermostating, control and automatic regulation of reactor parameters are analyzed. Based on an analysis of their advantages and disadvantages, a flow-type cascade reactor plant was designed and installed. For the installation, a system has been developed to regulate the parameters of the leaching process - temperature, pH of the mixture of pulp and bacterial suspension, frequency of mixing the mixture, aeration system, thermostating.

**Keywords:** bacterial-chemical leaching, ore pulp, bacterial suspension, reactor, reactor plant

**For citation:** Vopilin R. S., Iodis V. A. Cascade reactor plant for bacterial-chemical leaching ore. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):49-54. (In Russ.). [https://doi.org/10.56195/20793332\\_2024\\_5\\_49\\_54](https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_49_54).

### Введение

Бактериально-химическое выщелачивание (БХВ) металлов представляет собой перспективную технологию гидрометаллургической переработки и обогащения рудного сырья благодаря простоте организации и снижению вредного воздействия на окружающую среду. Различают кучное, подземное и реакторное выщелачивание. Реакторное бактериально-химическое выщелачивание руд начали использовать еще в XX веке с целью окисления сульфидов ценных металлов, например Ni, Cu, Co, до сульфатов в отдельных реакторах или реакторных установках.

Выщелачивание при использовании реакторных установок в сравнении с кучным или подземным выщелачиванием требует существенных капитальных и больших эксплуатационных затрат. Снижение данных затрат возможно путем интенсификации кинетики самого процесса и автоматизации установок. К контролю и регулированию параметров (автоматизации) относится система регулирования температуры, водородного показателя, окислительно-восстановительного потенциала смеси измельченной руды, воды (пульпы) и бактериальной суспензии, а также частоты перемешивания смеси, объемного расхода воздуха (аэрации).

**Цель работы:** разработка каскадной реакторной установки для бактериально-химического выщелачивания руд на основании анализа конструкций реакторных установок и реакторов.

#### Материал и методы исследований

Обзор и анализ конструкций существующих реакторов и реакторных установок.

#### Бактериально-химические реакторы

Известна конструкция реактора (рис. 1) для БХВ тиобактериями пирит-пирготитовой фракции, где для насыщения кислородом смеси бактериальной суспензии и измельченной руды + воды (пульпа) применена труба Вентури [1].

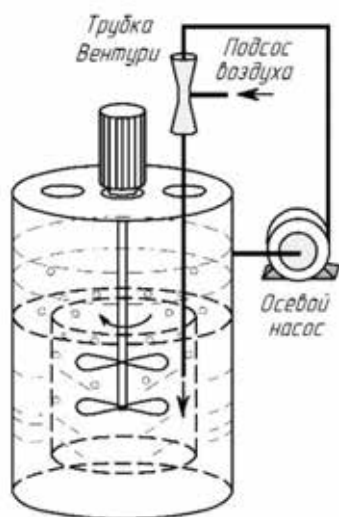


Рис. 1. Схема реактора для бактериально-химического выщелачивания тиобактериями пирит-пирготитовой фракции

Fig. 1. Schema of the reactor for biochemical treatment of thiobacteria of the pyrite-pyrgotite fraction

При прохождении смесью суспензии и пульпы трубы Вентури в момент ее замкнутой циркуляции, обеспечиваемой осевым насосом, происходит подсос воздуха, который вместе с пульпой направляется в реактор под уровень жидкости. Подача обогащенной воздухом пульпы происходит над механической мешалкой и обеспечивает ее циркуляцию через низ реактора в верхнюю его часть и далее к насосу.

Недостатками данного реактора являются неравномерность насыщения кислородом смеси бактериальной суспензии и пульпы, отсутствие в реакторе автоматической системы поддержания температуры (система термостатирования), системы контроля и автоматического регулирования параметров процесса, отсутствие подачи  $\text{CO}_2$  и конденсатотводчика (системы улавливания испарений).

К преимуществам можно отнести простоту конструкции системы насыщения кислородом жидкости реактора.

Обеспечение равномерной подачи и обогащение смеси рудной пульпы и бактериальной суспензии (термофильные бактерии типа *Acidianus brierleyi* и *Metallosphaera sedula*)  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$  решена в реакторе (рис. 2) [2], где данные газы подаются снизу реактора через распылительную трубку.

Рабочее давление реактора варьируется от 137 882 до 206 812 Па. В нем полностью автоматизирован данный процесс. Реактор емкостью 200 л имеет механическую систему

перемешивания, систему подогрева, расположенную внутри и снаружи по корпусу реактора. Контроль концентраций  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$  осуществляется как в пульпе, так и над ее свободной поверхностью.

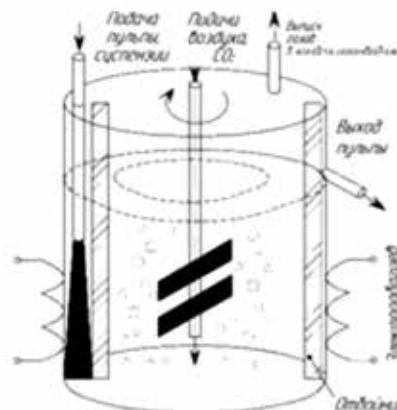


Рис. 2. Схема реактора для обогащения смеси рудной пульпы и бактериальной суспензии

Fig. 2. Schema of a reactor for enriching a mixture of ore pulp and bacterial suspension

Установка [2] позволяет повысить кинетику процесса БХВ за счет равномерной подачи и автоматизации процесса обогащения смеси  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$ , однако не термостатирована.

Известен реактор для БХВ сульфидных минералов [3] при температурах от 40 до 50 °С, в котором насыщение пульпы кислородом воздуха (21 об.%), углекислым газом (от 0,5 до 5 %) осуществлялось из отверстия в валу механической мешалки.

Реактор имел корпус из нержавеющей стали, отбойники для турбулизации потока перемешиваемой смеси пульпы и бактериальной суспензии (бактерии – *Acidithiobacillus*, *Thiobacillus*, *Leptospnillum*, *Ferromicrobium* и *Acidiphilium*), ТЭНы, патрубки подачи пульпы в реактор и выпуска газов. Реактор может быть снабжен датчиками контроля параметров, способен очищать выходящие газы. К недостаткам изобретения [3] можно отнести сложность организации процесса аэрации через отверстия в валу механической мешалки, низкую степень аэрации пульпы кислородом воздуха ввиду низкой производительности аэратора, а также отсутствие системы термостатирования.

Большинство вышеуказанных недостатков устранено в конструкции реактора для БХВ сульфидов металлов Zn, Cu, Ag, Ni, Co, Mn [4]. Измельченная сульфидная руда смешивается с бактериальной суспензией непосредственно в реакторе при перемешивании механической мешалкой. Далее в смесь начинает подаваться воздух через специальные аэрационные блоки реактора, имеющие возможность перемещения вдоль корпуса реактора. В конструкции предусмотрена система термостатирования в виде нагревательного элемента и воздушного охлаждения. Для контроля параметров процесса БХВ предусмотрен блок управления и терморегуляции. Для поддержания и регулирования значения pH среды пульпы, а также подачи реагентов модификаторов предусмотрен насос-дозатор.

Недостатком данного реактора [4] является сложность удаления пустой породы со дна реактора, отсутствие системы улавливания испарений реактора и обогащения воздуха углекислым газом.

Практически не имеет недостатков конструкция реактора для выщелачивания сульфидной руды, содержащей Ni, Co, Cu. Реактор, представленный на рисунке 3, имел системы механического перемешивания пульпы, аэрации пульпы, термостатирования и систему управления с возможностью сбора, регистрации, регулирования показателей процесса и возможностью контроля над процессом.

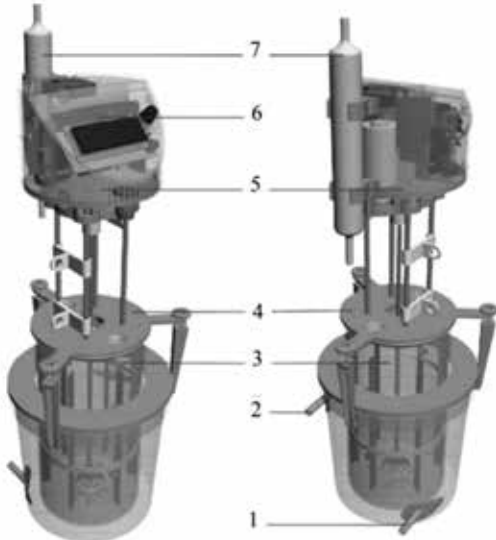


Рис. 3. Реактор для выщелачивания сульфидной руды [5]: 1 – подача тепло/хладоносителя; 2 – отвод тепло/хладоносителя; 3 – рабочий объем; 4 – крышка; 5 – станина крепления системы контроля и регулирования параметров процесса; 6 – дисплей; 7 – конденсатотводчик  
Fig. 3. Reactor for leaching sulfide ore [5]: 1 – heat/coolant supply; 2 – heat/coolant removal; 3 – working volume; 4 – cover; 5 – frame for fastening the system for monitoring and regulating process parameters; 6 – display; 7 – condensate drain

#### Бактериально-химические реакторные установки

Известна реакторная установка каскадного типа герметизированных реакторов с пневмомеханическим перемешиванием, перемещением смеси рудной пульпы и бактериальной суспензии по реакторам установки посредством подачи воздуха в нижнюю часть каждого из 3–5 реакторов (1-й контактный чан) и образования в них избыточного давления [6].

К преимуществам данной установки можно отнести возможность плавного регулирования скорости потока пульпы без использования насосов, а к недостаткам – отсутствие системы термостатирования, системы автоматического регулирования параметров процесса БХВ, системы улавливания и отвода испарений.

Выявленные недостатки реакторной установки [6] частично учтены при создании проточной каскадной установки для БХВ халькопиритового концентрата с электрохимическим контролем окислительно-восстановительного потенциала [7].

Принципиальная схема показана на рисунке 4.

Процесс выщелачивания осуществлялся в четырех реакторах, первый из которых выполнял роль контактного чана при проточке смеси рудной пульпы и бактериальной суспензии по каскаду реакторов самотеком. В реакторах обеспечивалась аэрация воздухом, обогащенным углекислым газом ( $\approx 2\%$ ). Однако в данной установке также отсутствует система термостатирования (охлаждения/нагрева пульпы), как и в установках [8, 9].

Установка [8] предназначалась для БХВ арсенопиритовых руд и включала три реактора и контактный чан для приготовления смеси пульпы и бактериальной суспензии. Реакторы снабжены отбойниками для турбулизации потока перемешиваемой смеси пульпы и бактериальной суспензии,

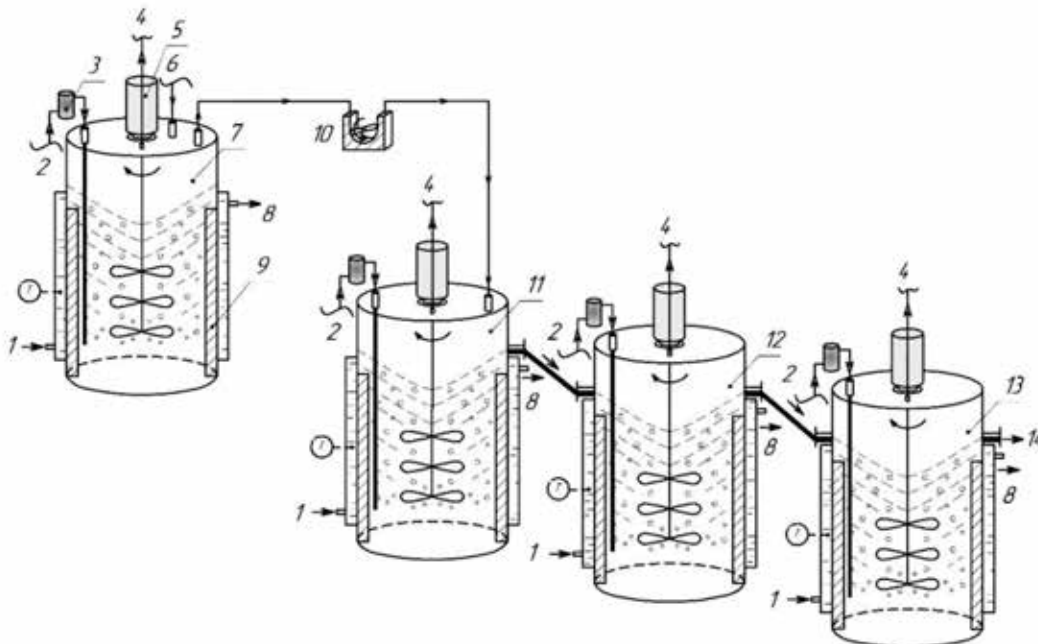


Рис. 4. Схема установки бактериально-химического выщелачивания арсенопиритовых руд [8]: 1 – подача воды в рубашки реакторов; 2 – подача воздуха; 3 – ротаметр; 4 – выход паров в конденсатотводчик; 5 – система перемешивания; 6 – загрузка руды, воды, бактериальной суспензии; 7 – чан для смешивания пульпы и бактериальной суспензии; 8 – выход воды из рубашки реакторов; 9 – отбойники; 10 – перистальтический насос; 11, 12, 13 – реакторы 1–3; 14 – подача продуктивного раствора на сорбцию  
Fig. 4. Schema of the installation of water treatment for arsenopyrite ores [8]: 1 – water supply to reactor jackets; 2 – air supply; 3 – rotameter; 4 – vapor release into the condensate trap; 5 – mixing system; 6 – loading of ore, water, bacterial suspension; 7 – vat for mixing pulp and bacterial suspension; 8 – water outlet from the reactor jacket; 9 – bumpers; 10 – peristaltic pump; 11, 12, 13 – reactors 1–3; 14 – supply of productive solution for sorption

но отсутствуют приборы измерения/контроля pH, Eh, температуры процесса выщелачивания.

Реакторной установкой, лишенной недостатков, по мнению авторов, является установка проточного типа для БХВ пиритового концентрата, состоящая из четырех резервуаров из нержавеющей стали марки 304-L, выставленных в каскад [10]. Первый резервуар имел емкость 50 л, остальные — по 20 л. Процесс проходил при следующих параметрах продолжительности, аэрации и частоты перемешивания пульпы: для первого реактора — 3 дня, 2000 л/ч, 350 об/мин, для остальных — 1,3 дня, 900, 700 и 500 л/ч, 390 об/мин.

Установка имела возможность плавно регулировать скорость потока пульпы, была оснащена системой термостатирования (циркуляция холодной воды и электрическая система нагрева), системой улавливания и отвода испарений, механической системой перемешивания и системой аэрации воздухом, обогащенным CO<sub>2</sub>.

Результаты анализа конструкций реакторных установок и реакторов для БХВ руд с указанием их преимуществ и недостатков представлены в таблице.

Таблица / Table

Результаты анализа конструкций реакторных установок и реакторов  
Results of the analysis of reactor plant and reactor designs

| Источник / Source | Наличие / Availability                               |                                                                                                                     |                                                       |                                                     |                                                                                             |
|-------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   | системы термостатирования /<br>Thermostating systems | системы контроля и автоматического регулирования параметров /<br>Monitoring and automatic parameter control systems | системы улавливания испарений / Vapor capture systems | плавного регулирования потока / Smooth flow control | аэрации воздухом, обогащенным CO <sub>2</sub> / Aeration with CO <sub>2</sub> -enriched air |
| [1]               | –                                                    | –                                                                                                                   | –                                                     | –                                                   | +/-                                                                                         |
| [2]               | +/-                                                  | +                                                                                                                   | +                                                     | –                                                   | +                                                                                           |
| [3]               | –                                                    | +                                                                                                                   | +                                                     | –                                                   | +/-                                                                                         |
| [4]               | +                                                    | +                                                                                                                   | –                                                     | –                                                   | +/-                                                                                         |
| [5]               | +                                                    | +                                                                                                                   | +                                                     | –                                                   | +/-                                                                                         |
| [6]               | –                                                    | –                                                                                                                   | –                                                     | +                                                   | –                                                                                           |
| [7]               | –                                                    | +                                                                                                                   | +                                                     | +                                                   | +                                                                                           |
| [8–9]             | –                                                    | –                                                                                                                   | +                                                     | +                                                   | +                                                                                           |
| [10]              | +                                                    | +                                                                                                                   | +                                                     | +                                                   | +                                                                                           |

Разработка каскадной реакторной установки

С учетом преимуществ и недостатков конструкций рассмотренных бактериально-химических реакторов и реакторных установок в НИГТЦ ДВО РАН была разработана, смонтирована каскадная реакторная установка проточного типа для БХВ.

Схема разработанной реакторной установки представлена на рисунке 5.

Реакторы, выполненные из нержавеющей стали, рабочим объемом 18 л каждый, крепятся на станинах, образуя каскад для обеспечения непрерывного проточного процесса БХВ. Снабжены мешалками с аксиальным потоком среды, патрубками подвода и отвода воды для термостатирования реакторов, воздуха и углекислого газа, отбойниками

для турбулизации перемешиваемой смеси рудной пульпы (4,32–4,79 % Ni; 0,61–0,75 % Cu; 0,094–0,12 % Co) и бактериальной суспензии (*Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidiphilium spp.*), патрубками для крепления контрольно-измерительной аппаратуры и сброса пульпы с пустой породой после завершения процесса. Оптимальное соотношение в смеси пульпы и суспензии твердой фазы к жидкой — 1 к 5 [11].

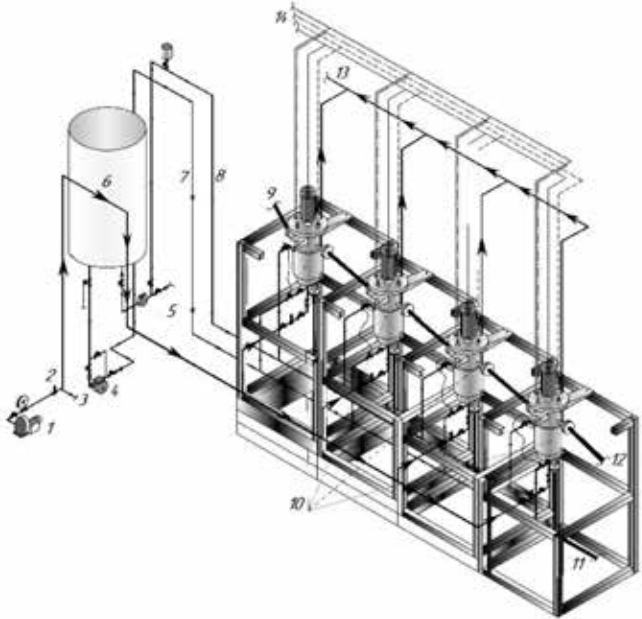


Рис. 5. Схема разработанной реакторной установки:

1 – вихревой компрессор Hailea Vortex Blower VB – 125G; 2 – регулятор расхода воздуха; 3 – подача углекислого газа; 4 – центробежный водяной насос Oasis CR 25/4; 5 – расходомер водяной; 6 – водонагреватель Thermex Omnia 100 V; 7, 8 – подача, отвод воды для термостатирования реакторов; 9 – загрузка микродозатором руды и бактериальной суспензии; 10 – реакторы; 11 – сброс пустой породы; 12 – подача продуктивного раствора на дальнейшую экстракцию; 13 – сброс воздуха, испарений в вытяжную вентиляцию; 14 – регулирование температуры 4 термометрами сопротивления ОВЕН ДТС174-50 M от 3 ПИД-регуляторов, тахометр и частотный преобразователь, датчик pH среды, датчик уровня

Использование мешалок с аксиальным потоком среды может обеспечить более высокий коэффициент массообмена при одинаковом крутящем моменте и потреблении энергии [12]. Проточное прохождение смесью рудной пульпы и бактериальной суспензии первого – четвертого реакторов происходит самотеком с плавным регулированием потока пульпы при периодической загрузке измельченной руды с использованием микродозатора марки MBW 042. Для увеличения кинетики процесса бактериально-химического выщелачивания, а именно снятия большего количества оксидных пленок с поверхности сульфидных минералов, смесь измельченной руды и дистиллированной воды (рудная пульпа) подвергается ультразвуковому воздействию с частотой 22 кГц, интенсивностью от 17 до 28 Вт/см<sup>2</sup> [13, 14].



Насыщение кислородом смеси рудной пульпы и бактериальной суспензии обеспечивается вихревым компрессором марки *Hailea Vortex Blower VB – 125G* (безмасляная технология «Non-Oil»), максимальный расход – 250 л/мин). Компрессор подает воздух через кольцевые барботеры в нижнюю часть реакторов, а удаление воздуха производится из верхней их части в вытяжную вентиляцию. Предусмотрена подача углекислого газа на линии подачи воздуха для его обогащения CO<sub>2</sub> от углекислотного баллона емкостью 40 л.

Термостатирование обеспечивается электрическим водонагревателем марки *Thermex Omnia 100 V* и циркуляционным насосом марки *Oasis CR 25/4*. *Thermex Omnia 100 V* имеет объем 100 л, с тремя режимами электрической мощности: 800, 1200 и 2000 Вт. Система контроля и автоматического регулирования параметров состоит из блока управления с контрольно-измерительными приборами, датчики которых заведены в порты на крышках реакторов (рис. 5). Регулирование температуры (оптимальная температура для хемолитотрофных микроорганизмов – 28–32 °C) [15] осу-

ществляется по сигналу термометров сопротивления марки *ОВЕН ДТС174-50М* на ПИД-регуляторы, которые регулируют подачу электромагнитных клапанов линий подачи воды в рубашки реакторов.

### Заключение

Анализ существующих реакторных установок и реакторов показал, что их конструкции мало отличаются друг от друга. Основное различие состоит в том, имеются или нет системы термостатирования, контроля и автоматического регулирования параметров процесса БХВ. Во всех рассмотренных установках и устройствах не предусмотрено удаление пустой породы из реакторов по окончании процесса БХВ.

В целях повышения скорости БХВ рассчитана, смонтирована каскадная реакторная установка для выщелачивания кобальт-медно-никелевых руд. В установке предусмотрены системы плавного регулирования потока пульпы, аэрации, термостатирования, контроля и автоматического регулирования параметров процесса.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Баттергем Р.Д., Хоффманн А.В., Катсикарус Н. Патент РФ № 93051551/12, 02.12.1992. Реактор. Патент России № 2139131. 1999. [Battergem R.D., Hoffmann A.V., Katsikarus N. Patent RF No. 93051551/12, 02.12.1992. Reactor. Russian Patent No. 2139131. 1999. (In Russ.)].
2. Romero-Miranda J. A. Patent WO № PCT/IB20 12/002044, 12.10.2012. Bioreactor for bioleaching with aeration and air diffusion system. Patent international № 2013057557. 2013.
3. Romero-Miranda J. A. Patent FI № 20020427, 06.03.2002. Biological leaching of sulfide minerals. Patent Finland № 122564. 2012.
4. Мязин В.П., Баранов В.В., Соболев А.В. Патент РФ № 2017147088, 29.12.2017. Ферментер для бактериального окисления сульфидных руд и концентратов. Патент России № 179139. 2018 г., Бюл. №13. [Myazin V.P., Baranov V.V., Sobolev A.V. Patent RF No. 2017147088, 12/29/2017. Fermenter for bacterial oxidation of sulfide ores and concentrates. Russian Patent No. 179139. 2018, Bull. No. 13. (In Russ.)].
5. Балыков АА, Левенец ОО, Хайнасова ТС. Проточный биореактор для исследования бактериально-химического выщелачивания сульфидных медно-никелевых руд и концентратов. *Записки Горного института*. 2018;232:383–387. [Balykov AA, Levenets OO, Khaynasova TS. Flow bioreactor for studying bacterial-chemical leaching of sulfide copper-nickel ores and concentrates. *Journal of Mining Institute*. 2018;232:383-87 (In Russ.)]. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.383.
6. Каравайко ГИ, Росси Дж, Агате А. [и др.]. Биоготехнология металлов: практическое руководство. М., 1989. 374 с. [Karavayko GI, Rossi J, Agate A, et al. Biogeotechnology of metals. Practical guide. Moscow, 1989 (In Russ.)].
7. Lotfalian M, Ranjbar M, Fazelipour MH, et al. The effect of redox control on the continuous bioleaching of chalcopyrite concentrate. *Minerals Engineering*. 2015;81:52-7. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.07.006.
8. Borja D, Nguyen KA, Silva RA, et al. Continuous bioleaching of arsenopyrite from mine tailings using an adapted mesophilic microbial culture. *Hydrometallurgy*. 2019;187:187-94. DOI: 10.1016/j.hydromet.2019.05.022.
9. Weston JM. Continuous biological leaching of copper from a chalcocite ore and concentrate in a saline environment: A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of applied science. The University of British Columbia, 1995.
10. d'Hugues P, Joulain C, Spolaore P, et al. Continuous bioleaching of a pyrite concentrate in stirred reactors: population dynamics and exopolysaccharide production vs. bioleaching performance. *Hydrometallurgy*. 2008;94:34-41. DOI:10.1016/j.hydromet.2008.05.045.
11. Левенец ОО. Биореакторы для биовыщелачивания сульфидных руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2018;(S57):176–184. [Levenets OO. Bioreactors for bioleaching of sulfide ores. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2018;(S57):176-84 (In Russ.)].
12. Хайнасова ТС. Реакторы с механическим перемешиванием в бактериально-химическом выщелачивании. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020;(S46):211–224. [Khaynasova TS. Reactors with mechanical stirring in bacterial-chemical leaching. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2020;S46:211-24 (In Russ.)].

13. Иодис ВА. Лабораторный реактор для ультразвукового воздействия на пульпу кобальт-медно-никелевой руды. *Горный журнал*. 2023;(12):81–87. [Iodis VA. Laboratory reactor for ultrasonic treatment of cobalt-copper-nickel ore pulp. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(12):81-7 (In Russ.)]. DOI: 10.17580/gzh.2023.12.13.
14. Iodis VA, Koydan IA. Investigation of oxide films removal process from the ore pulp particle surface during its ultrasonic treatment. *Non-Ferrous Metals*. 2024;(1):8-12. DOI: 10.17580/nfm.2024.01.02.
15. Киореску АВ, Мусихин ВО, Хомченкова АС. [и др.] Исследование чанового бактериально-химического выщелачивания сульфидных медно-никелевых руд месторождения Шануч (Камчатка) в проточном режиме. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015;S63:360–365. [Kioresku AV, Musikhin VO, Khomchenkova AS, et al. Study of vat bacterial-chemical leaching of sulfide copper-nickel ores of the Shanuch deposit (Kamchatka) in flow mode. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015;S63:360-5 (In Russ.)].

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Вопилин Роман Сергеевич** — младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук» (НИГТЦ ДВО РАН), Камчатский край, г. Петропавловск-Камчатский, Россия, e-mail: romanvopilin1993@gmail.com



**Иодис Валентин Алексеевич** — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук» (НИГТЦ ДВО РАН), Камчатский край, г. Петропавловск-Камчатский, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-8002-0658>, ResearcherID AEF-2566-2022, Scopus AuthorID — 58790763900, e-mail: iodisva@mail.ru

## ABOUT THE AUTHORS

**Roman S. Vopilin** — Junior Researcher, Scientific Research Geotechnological Center Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (NIGTC FEB RAS), Kamchatka Krai, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation, e-mail: romanvopilin1993@gmail.com

**Valentin A. Iodis** — Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Kamchatka Krai, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8002-0658>, ResearcherID AEF-2566-2022, Scopus Author ID — 58790763900, e-mail: iodisva@mail.ru

### Критерии авторства / Contribution:

Р. С. Вопилин — постановка задачи исследования, выполнение работы по систематизации материала, анализ результатов исследования и подготовка данных, написание текста статьи; В. А. Иодис — генерация идеи исследования, постановка задачи исследования / R. S. Vopilin — setting the research problem, performing work on systematizing the material, analyzing the research results and preparing data, writing the text of the article; V. A. Iodis — generation of research ideas, formulation of research problems.

### Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.