

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 669.2/.8:541.49:549.3

EDN: LMRIUH

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-3-538-546



Поведение основных элементов при автоклавном окислении полиметаллического сульфидного флотоконцентрата, содержащего вольфрам и молибден

А.В. Епифоров^{1✉}, С.В. Баликов², А.А. Шипнигов³¹⁻³Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, Иркутск, Россия

Резюме. Цель – изучить поведение попутных элементов (вольфрам, молибден, висмут), содержащихся в сульфидном золотосодержащем концентрате, в процессе автоклавного окисления. Исследования по автоклавному окислению проведены на сульфидном флотоконцентрате, измельченном до крупности частиц -0,045 мм, с содержанием золота 22,1 г/т, серебра 133,2 г/т, вольфрама 2,7%, молибдена 13%, висмута 0,7%. Процесс проводили при температуре 220°C и парциальном давлении кислорода 0,7 МПа в автоклаве объемом 2 дм³. Концентрации серной кислоты, ионов железа в растворе определяли титриметрическим методом анализа; для определения концентраций висмута, вольфрама, молибдена, меди, серебра, мышьяка в растворе, а также содержание висмута, вольфрама, молибдена, меди, мышьяка, свинца и формы железа и серы в кеке – атомно-эмиссионной спектроскопией с индуктивно связанной плазмой. Также проведен дифрактометрический анализ кека. Эксперименты по цианированию окисленного кека проводили при pH 10,0–10,5, концентрации NaCN 1 г/дм³ с ионитом «PuroliteS992» в течение 24 ч. В результате проведенных экспериментов по автоклавному окислению степень окисления сульфидов составила более 99%. Извлечение молибдена в раствор в форме $[\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_n]^{-(2n-2)}$ и MoO_2^{2+} составило 95%. За счет сокращения массы твердого происходило концентрирование висмута и вольфрама в кеке, где их содержание составило 1,66% и 12,7% соответственно. Установлено, что основными фазами кека являются шеелит, ангидрит, плюмбоярозит, бедантит. Извлечение драгоценных металлов при последующем цианировании составило: золота – 97,5%, серебра – 91,6%. Таким образом, при переработке сульфидного золотосодержащего концентрата по автоклавно-цианистой схеме молибден на 95% извлекается в раствор автоклавного окисления. При цианировании извлекается более 90% золота и серебра. Полученный кек не является отвальным, поскольку содержит значительное количество вольфрама (17%), висмута (0,9%), свинца (5,3%), молибдена (3,3%).

Ключевые слова: автоклавное окисление, сульфидные концентраты, золото, вольфрам, молибден, цветные металлы, цианирование

Для цитирования: Епифоров А.В., Баликов С.В., Шипнигов А.А. Поведение основных элементов при автоклавном окислении полиметаллического сульфидного флотоконцентрата, содержащего вольфрам и молибден // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 538–546. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-538-546>. EDN: LMRIUH.

METALLURGY

Original article

Element behavior during autoclave oxidation of polymetallic sulfide flotation concentrate containing tungsten and molybdenum

Alexander V. Epiforov^{1✉}, Stanislav V. Balikov², Anton A. Shipnigov³¹⁻³Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

Abstract. In this paper, we investigate the behavior of associated elements (tungsten, molybdenum, and bismuth) contained in a sulfide gold-bearing concentrate during its autoclave oxidation. The process is studied using a sulfide flotation concentrate, crushed to a particle sieve mesh size of minus 0.045 mm and containing 22.1 g/t of gold, 133.2 g/t of silver, 2.7% of tungsten, 13% of molybdenum, and 0.7% of bismuth. The process was carried out in a 2 dm³ autoclave at a temperature of 220°C and an oxygen partial pressure of 0.7 MPa. The concentrations of sulfuric acid and iron ions in the solution were determined by titrimetric analysis. Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy was used to determine the concentrations of bismuth, tungsten, molybdenum, copper, silver, and arsenic

in the solution, as well as the content of bismuth, tungsten, molybdenum, copper, arsenic, lead, and iron and sulfur forms in the cake. The cake was also examined using diffraction analysis. Experiments on cyanidation of oxidized cake were carried out in the pH range of 10.0–10.5 and a NaCN concentration of 1 g/dm³ with a PuroliteS992 ion exchange resin for 24 h. Autoclave oxidation experiments showed the sulfide oxidation degree to be higher than 99%. Extraction of molybdenum into solution in the form of $[\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_n]^{-(2n-2)}$ and MoO_2^{2+} amounted to 95%. The decrease in the solid mass led to an increase in the concentration of bismuth and tungsten in the cake, with their contents reaching 1.66% and 12.7%, respectively. The main phases in the cake were established to be scheelite, anhydrite, plumboyarosite, and bedantite. The extraction of precious metals at the subsequent cyanidation stage amounted to 97.5% of gold and 91.6% of silver. Therefore, autoclave cyanide processing of sulfide gold-containing concentrates leads to a molybdenum extraction in the autoclave oxidation solution at the level of 95%. During cyanidation, more than 90% of gold and silver are extracted. Due to the significant amount of tungsten (17%), bismuth (0.9%), lead (5.3%), and molybdenum (3.3%), the obtained cake cannot be considered a waste product.

Keywords: pressure oxidation, sulfide concentrates, gold, tungsten, molybdenum, non-ferrous metals, cyanidation

For citation: Epiforov A.V., Balikov S.V., Shipnigov A.A. Element behavior during autoclave oxidation of polymetallic sulfide flotation concentrate containing tungsten and molybdenum. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):538-546. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-538-546>. EDN: LMRIUH.

ВВЕДЕНИЕ

Автоклавное окисление упорных сульфидных золотосодержащих концентратов является одним из наиболее эффективных методов переработки данного типа сырья. Этот процесс является высокопроизводительным и высокотехнологичным, что позволяет окислить любые сульфиды и вскрыть «упорное» золото за короткий промежуток времени, не прибегая к экстремально высоким температурам и исключая выбросы токсичных газов и пылей в окружающую среду [1].

Традиционные схемы автоклавной переработки золотосодержащих руд и концентратов включают их автоклавное окисление, сгущение окисленной пульпы, отмывку и защелачивание твердого окисленного остатка с последующим его цианированием для извлечения драгоценных металлов [2, 3]. В настоящее время в мире функционирует 21 предприятие, использующее процесс автоклавного окисления для переработки упорных золотосодержащих продуктов, основными сульфидами в которых являются пирит и арсенопирит. Однако существует множество месторождений первичных золотосодержащих руд, где помимо основных сульфидов железа и мышьяка содержатся различные минералы, которые зачастую представляют промышленную ценность и влекут необходимость в поиске технологических решений для их попутного и/или совместного извлечения [4, 5]. К таким попутным компонентам чаще всего относятся цветные металлы: медь, цинк, никель, кобальт и др. [6], реже

свинец, сурьма, олово⁴ [7, 8]. Существуют и более «экзотические» рудные продукты, которые содержат редкие и весьма ценные компоненты, например вольфрам, молибден, висмут, рений, уран, ванадий и др. [9, 10]. Данных о поведении этих элементов при автоклавном окислении сульфидных концентратов в информационном пространстве практически нет. Ввиду вышесказанного возникает необходимость в изучении этого вопроса и его научной проработке.

Целью настоящей работы являлось изучение поведения редких элементов (вольфрам, молибден, висмут), содержащихся в сульфидном золотосодержащем концентрате, в процессе автоклавного окисления. Данный концентрат является потенциальным сырьем для получения золота по автоклавной технологии, однако существует необходимость в определении возможности попутного извлечения сопутствующих ценных компонентов в товарную продукцию, что может принести дополнительную выгоду недропользователю и способствовать более рациональному использованию минерального сырья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследований. Исследования по автоклавному окислению проведены на сульфидном флотационном концентрате, полученном из полиметаллической руды одного из месторождений РФ. Основным ценным компонентом в концентрате являлось золото, попутными – серебро, вольфрам, молибден, медь, висмут и свинец. Содержание основ-

⁴Дзгоев Ч.Т. Автоклавно-пирометаллургическая технология переработки золотосодержащих и свинцово-цинковых флотконцентратов: дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2016. 147 с.

Таблица 1. Содержание основных компонентов в концентрате**Table 1.** Content of main components in concentrate

г/т		Массовая доля элементов, %									
Au	Ag	W	Mo	Cu	Bi	Pb	As	S _(общ)	S _(сульфид)	Fe _(общ)	Fe _(сульфид)
22,1	133,2	2,7	13,0	0,5	0,7	1,1	3,4	30,2	30,0	25,2	20,25

ных компонентов концентрата представлено в табл. 1.

Качественный дифрактометрический XRD-анализ (от англ. X-ray diffraction analysis) показал, что в исследуемом концентрате вольфрам представлен шеелитом и молибдошеелитом, молибден – молибденитом, медь – халькопиритом, висмут – висмутином. Из сульфидов существенно преобладает пирит. Отмечается значимое содержание галенита и арсенопирита. Из нерудных минералов в незначительных количествах присутствуют карбонаты, флюорит, кварц, пироксены, гранаты.

Золото в исследуемом концентрате ассоциировано с сульфидами (пиритом, арсенопиритом), серебро – с галенитом. Ввиду этого концентрат являлся упорным к цианированию сырьем.

Методика экспериментов. Перед автоклавным окислением концентрат доизмельчали до $R_{95} = 0,045$ мм в шаровой мельнице. Столь тонкий помол был необходим для более полного окисления галенита, зерна которого могут пассивироваться в процессе автоклавного окисления пленкой нерастворимого сульфата свинца, которая препятствует доступу кислорода к поверхности непрореагировавшего сульфида.

Измельченный концентрат подвергали кислотной обработке раствором серной кислоты в лабораторном агитаторе до достижения pH пульпы 2. Пульпу после кислотной обработки переносили в лабораторный автоклав с рабочим объемом 2 дм³ и доводили до необходимого соотношения Ж:Т, рассчитанного из теплового баланса окисления сульфидов (9:1).

Автоклавное окисление проводили при температуре 220°C при парциальном давлении кислорода 0,7 МПа. Измерение давления внутри автоклава осуществляли при помощи цифрового и аналогового манометров. Для непрерывного измерения расхода кислорода и поддержания давления на заданном уровне автоклав оснащен системой «Bronkhorst» (Нидерланды).

Момент начала подачи кислорода принимали за начало опыта. Окончанием опыта по автоклавному окислению считали момент прекращения подачи кислорода. В ходе эксперимента с помощью системы непрерывного измерения расхода кислорода фиксировали общее давление в автоклаве и определяли расход кислорода (суммарный и текущий). По характеру зависимости расхода кислорода от времени определяли продолжительность и степень завершенности процесса окисления сульфидов. В начальный период окисления избыточное тепло отводили подачей охлаждающей воды во внутренний теплообменник автоклава.

После завершения процесса окисления пульпу в автоклаве остужали до 95°C и кондиционировали при атмосферном давлении в течение двух часов для разрушения основных сульфатов и перевода сульфатного железа в раствор (процесс «HotCure» [11]).

После кондиционирования окисленную пульпу фильтровали и промывали водой на фильтре. Кек сушили при комнатной температуре и взвешивали. В маточном растворе определяли концентрации серной кислоты, ионов двух- и трехвалентного железа титриметрическим методом, концентрации висмута, вольфрама, молибдена, меди, серебра и мышьяка – методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES от англ. inductively coupled plasma atomic emission spectrometry). Содержание в кек висмута, вольфрама, молибдена, меди, мышьяка и свинца, а также железа и серы (общую и окисленную формы) определяли ICP-AES анализом. Кроме того, фазовый состав кек определяли XRD-анализом.

По результатам анализов рассчитывали извлечение (распределение) ценных компонентов, а также степень окисления сульфидов, по которой оценивали эффективность автоклавного окисления.

Отмытый от серной кислоты и сульфатов кек после сушки подвергали нейтрализации и защелачиванию. Кек распульповывали во-

дой и в полученную пульпу подавали известь до достижения pH пульпы 10,0–10,5. После защелачивания в пульпу подавали цианид натрия до концентрации 1 г/дм³, ионообменную смолу «PuroliteS992» (7% об.) и проводили сорбционное цианирование в течение 24 ч. После окончания цианирования пульпу фильтровали, кек сушили, взвешивали и анализировали на содержание в ней ионов висмута, вольфрама, молибдена, свинца и меди ICP-AES анализом, на золото и серебро – пробирным анализом с ААС-окончанием. По результатам анализов рассчитывали извлечение ценных компонентов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Автоклавное окисление. На рис. 1 представлены кривые расхода кислорода в процессе автоклавного окисления.

Показано, что продолжительность окисления исследуемого концентрата составляет 20–21 мин. Расход кислорода – около 600 кг/т.

В табл. 2 представлены результаты анализа кек автоклавного окисления, в табл. 3 – результаты анализа полученного раствора. Результаты автоклавного окисления концентрата представлены в табл. 4.

Показано, что степень окисления флотоконцентрата составила более 99%. Извлечение молибдена в раствор составило 95% при его концентрации в маточном растворе 14,4 г/дм³. Остаточное содержание молибдена в кеке составило 3,8% при выходе кек лишь 19,5%.

Возможно, окисление молибденита в процессе сернокислотного автоклавного окисления протекает по реакции (1).

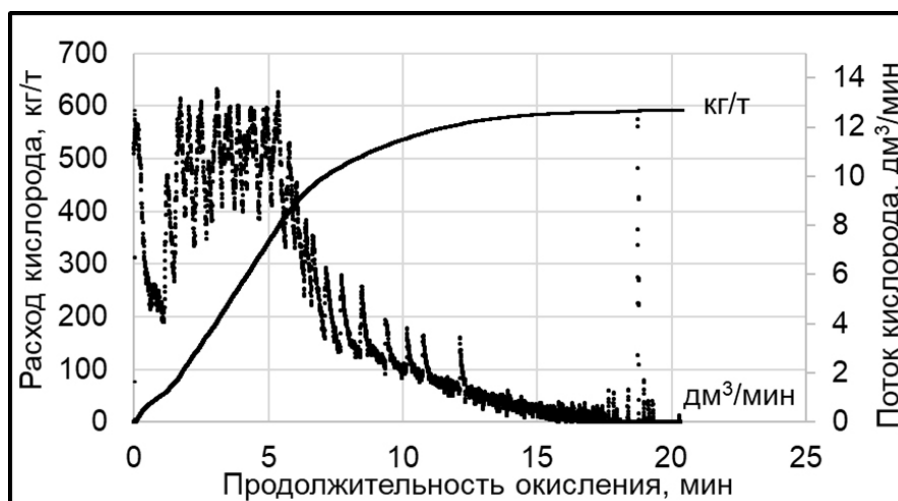


Рис. 1. Кривые расхода кислорода в процессе автоклавного окисления исследуемого концентрата

Fig. 1. Curves of oxygen consumption during studied concentrate pressure oxidation

Таблица 2. Содержание основных компонентов в кек автоклавного окисления

Table 2. Content of main components in pressure oxidation cake

Выход кек, %	Массовая доля в кеке, %									
	Mo	W	Bi	Cu	Pb	As	Fe _(общ)	Fe _(сульфидн)	S _(общ)	S _(сульфидн)
19,5	3,8	12,7	1,7	0,01	3,4	2,4	17,1	0,9	5,7	0,7

Таблица 3. Содержание основных компонентов в растворе автоклавного окисления

Table 3. Content of main components in pressure oxidation solution

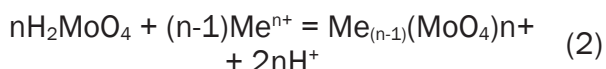
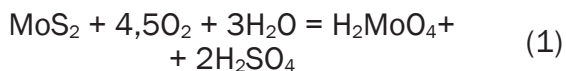
Концентрация в растворе, г/дм ³									Eh, мВ	pH
Mo	W	Cu	Bi	As	Ag, мг/дм ³	H ₂ SO ₄	Fe ³⁺	Fe ²⁺		
14,4	0,26	0,6	0,39	4,1	0,77	122,5	21,3	1,4	484	0,93

Таблица 4. Результаты автоклавного окисления концентрата

Table 4. Concentrate pressure oxidation results

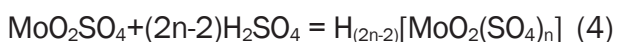
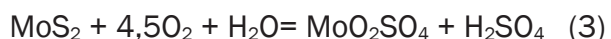
Степень окисления, %	Извлечение в раствор, %				
	Mo	W	Cu	Bi	Ag
99,6	95	0,14	99,3	45,1	5

Однако образующаяся молибденовая кислота обычно нестабильна в сернокислых растворах, содержащих ионы металлов, таких как Fe^{3+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} и др. При этом молибден выпадает в осадок в виде молибдатов соответствующих металлов (Me), по уравнению (2):



Поэтому наиболее вероятными формами молибдена в растворе в данном случае будут комплексы молибденил-сульфата $[\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_n]^{-(2n-2)}$ и молибденил-ион MoO_2^{2+} в составе MoO_2SO_4 [12, 13].

Молибденил-сульфат при автоклавном окислении молибденита может образовываться в соответствии с уравнением (3). При этом состояние молибдена в растворе характеризуется равновесием (4) и зависит от концентрации серной кислоты:



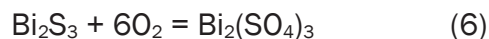
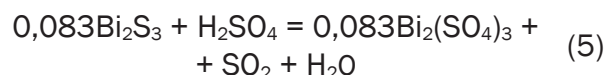
Дальнейшее извлечение молибдена из сернокислых растворов можно проводить ионным обменом [12].

Также при автоклавном окислении концентрата в раствор извлекается медь. Извлечение меди составило 99,3%. Концентрация меди в растворе – 600 мг/дм³. Для извлечения меди из автоклавных растворов можно использовать известные методы [14–16], в частности, сульфидное осаждение, жидкостную экстракцию и др.

Висмут также частично переходит в раствор автоклавного окисления (45%). При этом концентрация висмута в растворе составляет 390 мг/дм³. В то же время за счет сокращения массы твердой фазы происходило концентрирование висмута в кеках, где его содержание достигало 1,66%.

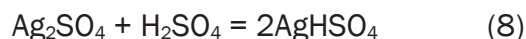
Наиболее вероятной формой висмута в сернокислых автоклавных растворах является сульфат висмута, который образуется при взаимодействии висмута с серной кислотой при температурах выше 100°C в соответствии с реакцией (5), а также при автоклав-

ном окислении висмута кислородом по реакции (6):



Для извлечения висмута из раствора можно применять сорбцию и, возможно, экстракцию [16, 17].

Кроме того, установлено, что в процессе автоклавного окисления в сернокислый раствор может переходить часть серебра (до 5%, 0,77 мг/дм³). Серебро в сильноокислых средах может образовывать сульфатные соединения в соответствии с реакциями (7) и (8) [18]:



Серебро, содержащееся в этой форме, можно извлечь химическим осаждением в виде хлорида серебра, цементацией или иным методом.

Следует отметить, что концентрация вольфрама в растворе автоклавного окисления составляла 0,26 мг/дм³, что соответствовало его извлечению в раствор 0,14%. Так как стандартные соединения вольфрама (вольфраматы, вольфрамовая кислота) являются нерастворимыми в сернокислых растворах, вероятно, в данном случае имело место образование более сложных комплексных соединений. Данный вопрос, а также вопрос извлечения вольфрама из растворов автоклавного окисления требует дальнейшей проработки.

По данным химического анализа содержание вольфрама в кеке автоклавного окисления составило 12,7%.

На рис. 2 представлен качественный состав кека по данным XRD-анализа (фрагмент дифрактограммы).

Показано, что основными фазами кека автоклавного окисления, имеющими кристаллическое строение, являются шеелит и ангидрит (сульфат кальция). По-видимому, ангидрит образовался при частичном растворении (выщелачивании) вольфрама из шеелита в процессе автоклавного окисления, при этом вольфрамат-ион заместился

⁵Марченко Н.В., Вершинина Е.П., Гильдебрандт Э.М. Металлургия тяжелых цветных: учеб. пособ. Красноярск: СФУ, 2009. 394 с.

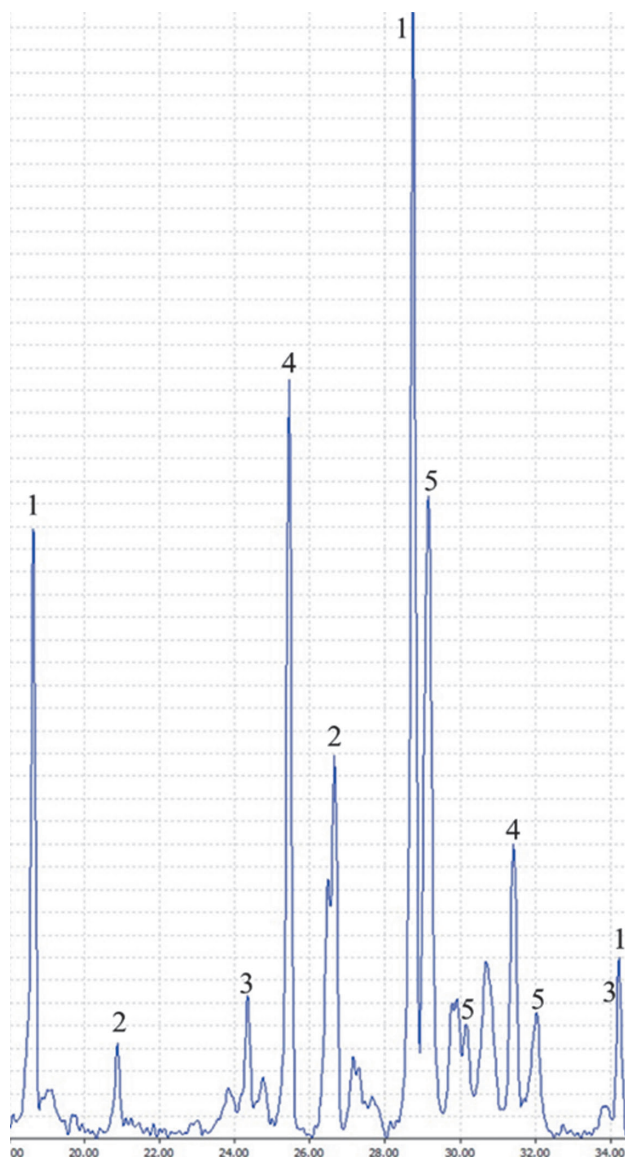


Рис. 2. Фрагмент дифрактограммы кека автоклавного окисления: 1 – CaWO_4 – шеелит; 2 – SiO_2 – кварц;

3 – $\text{Pb}(\text{Fe}_{2,54}\text{Al}_{0,46})(\text{As}_{1,07}\text{O}_4)(\text{S}_{0,93}\text{O}_4)(\text{OH})_6$ – бедантит; 4 – CaSO_4 – ангидрит; 5 – $\text{PbFe}_6(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12}$ – плюмбоярозит

Fig. 2. A fragment of the X-ray diffraction pattern of pressure oxidation cake: 1 – CaWO_4 – scheelite; 2 – SiO_2 – quartz; 3 – $\text{Pb}(\text{Fe}_{2,54}\text{Al}_{0,46})(\text{As}_{1,07}\text{O}_4)(\text{S}_{0,93}\text{O}_4)(\text{OH})_6$ – beudantite; 4 – CaSO_4 – anhydrite; 5 – $\text{PbFe}_6(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12}$ – plumbojarosite

на сульфат-ион с образованием малорастворимого сульфата кальция по реакции (9). Также наличие ангидрита можно объяснить разложением карбонатов кальция в сернокислой среде:



Кроме того, в кеке идентифицирован плюмбоярозит и мышьяковый плюмбоярозит (бедантит), которые образуются при взаимодействии сульфата свинца при гидролизе

сульфата железа (III) в процессе автоклавного окисления галенита и пирита, а также при гидролизе мышьяковой кислоты, полученной при окислении арсенопирита. Подробнее механизм образования данных продуктов описан в работе [19].

Содержание золота и серебра в кеке автоклавного окисления с учетом сокращения составляло 113,3 и 650,1 г/т соответственно. Извлечение драгоценных металлов сорбционным цианированием по технологии RIL («смола в выщелачивании») составило: Au – 97,5%, Ag – 91,6%.

Следует отметить, что данный уровень извлечения серебра является достаточно высоким для автоклавной технологии, так как серебро в процессе автоклавного окисления склонно взаимодействовать с сульфатом железа (III) с образованием упорного к цианированию аргентоярозита. Для извлечения серебра, связанного в ярозитную форму, необходимо использование специальных методов, например горячей известковой обработки кеков и др. [20].

По данным химического анализа кеков при цианировании в раствор может извлекаться до 46% Mo, 17% W, 66% Bi, 95% Cu. Затем эти компоненты могут частично сорбироваться на смолу, а также выпадать в осадок из раствора. Проанализировать данные продукты с приемлемой точностью на стадии лабораторных испытаний не представляется возможным ввиду малого количества материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованиями показано, что при переработке сульфидного золотосодержащего концентрата по автоклавно-цианистой схеме основная масса меди (99%) и молибдена (95%) извлекается в сернокислый раствор автоклавного окисления, основная масса золота и серебра (более 90%) – при цианировании.

Висмут и вольфрам практически «размываются» по технологическим продуктам, при этом за счет сокращения массы твердого в процессе переработки концентрата происходит концентрирование данных элементов в кеках цианирования. Также в кеках концентрируется свинец.

Таким образом, показано, что полученный в результате исследований продукт (кек RIL)

не является отвальным, так как содержит значительное количество ценных компонентов, основными из которых является вольфрам (17%), а также висмут (0,9%),

свинец (5,3%), молибден (3,3%). Для переработки данного продукта необходимо проводить дополнительные укрупненные исследования.

Список источников

1. Thomas K.G. Pressure oxidation overview // Developments in Mineral Processing. 2005. Vol. 15. P. 346–369. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15015-7](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15015-7).
2. Баликов С.В., Гудков С.С., Емельянов Ю.Е., Богородский А.В., Епифоров А.В., Болдырев А.В., Дзгоев Ч.Т. Автоклавное окисление золотосодержащих руд и концентратов: монография. Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 2016. 471 с.
3. Набойченко С.С., Шнеерсон Я.М., Калашникова М.И., Чугаев А.В. Автоклавно-гидрометаллургия цветных металлов. Екатеринбург: УПИ им. Б.Н. Ельцина, 2009. Т. 2. 612 с.
4. Ferron C.J. Recovery of gold as by-product from the base-metals industries // Gold Ore Processing. 2016. Chapt. 46. P. 831–856. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15035-2](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15035-2).
5. Dreisinger D.B. Case study flowsheets: copper gold concentrate treatment // Gold Ore Processing. 2016. Chapt. 44. P. 803–820. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15033-9](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15033-9).
6. Епифоров А.В., Богородский А.В., Баликов С.В., Емельянов Ю.Е., Копылова Н.В. Лабораторные исследования высокотемпературного автоклавного окисления полиметаллических золотосодержащих сульфидных концентратов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 1. С. 116–119. EDN: OOVJBZ.
7. Dzgoyev C.T., Yevtushevich I.I., Schtoick S.G., Yepiforov A.V., Gudkov S.S., Yemilianov Y.E., Balikov S.V. Pressure oxidation pyrometallurgical technology of gold-bearing and lead and zinc sulfide concentrates undergoing combined treatment // IMPC 2016 - 28TH International Mineral Processing Congress (Québec, 11–15 September 2016). Québec: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2016. Paper № 801. EDN: YCALZJ.
8. Евтушевич И.И., Дзгоев Ч.Т., Епифоров А.В., Гудков С.С., Емельянов Ю.Е., Баликов С.В. Автоклавно-пирометаллургический способ переработки золотосодержащих и свинцово-цинковых концентратов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2017. Т. 10. № 1. С. 110–124. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0011>. EDN: YMRZVZ.
9. Смирнов К.М., Молчанова Т.В., Ананьев А.В., Акимов И.Д., Овчаренко Е.В., Крылова О.К. Перспективная технология переработки комплексных урановых руд Эльконского месторождения // Атомная энергия. 2017. Т. 122. № 6. С. 309–314. EDN: YTDGZH.
10. Шаталов В.В., Пирковский С.А., Смирнов К.М. Окисление пирита кислородом и совместное выщелачивание урана из руды в условиях автогенного автоклавного процесса // Атомная энергия. 2007. Т. 102. № 2. С. 120–124. EDN: IWDRHX.
11. Fleming C.A. Basic iron sulphate – a potential killer for pressure oxidation processing of refractory gold concentrates if not handled appropriately // SGS Minerals Services. Technical Paper. 2009. № 6. Режим доступа: <https://www.sgs.ca/-/media/global/documents/technical-documents/sgs-technical-papers/sgs-min-tp2009-06-basic-iron-sulphate-in-pox-processing-of-refractory-gold.pdf> (дата обращения: 28.02.2024).
12. Бекбутаева Н.Н., Шарипов Х.Т., Лукомская Г.А., Бекбутаев А.Н., Ташалиев Ф.У., Сапаров А.Р. Извлечение молибдена из сернокислых маточных растворов после сорбции рения // Universum: технические науки. 2021. № 12. Режим доступа: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12816> (дата обращения: 28.02.2024).
13. Бекбутаева Н.Н., Шарипов Х.Т., Лукомская Г.А., Бекбутаев А.Н., Ташалиев Ф.У. Извлечение молибдена из сернокислых маточных растворов после сорбции рения // Композитные материалы на основе техногенных отходов и местного сырья: состав, свойства и применение: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (г. Ташкент, 16–17 сентября 2021 г.). Ташкент: Saydana-print, 2021. С. 84–86.
14. Епифоров А.В., Емельянов Ю.Е., Копылова Н.В., Шкетова Л.Е., Селезнев А.Н., Михайлова А.Н. [и др.]. Современные методы извлечения цветных металлов из технологических растворов // Анализ, добыча и переработка полезных ископаемых: сб. науч. тр. (посвящен 150-летию института Иргиредмет). Иркутск: АО «Иргиредмет», 2021. С. 185–212.
15. Михайлова А.Н., Файберг А.А., Дементьев В.Е., Минеев Г.Г., Бонч-Осмоловская Е.А. Получение биогенного сероводорода // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 1. С. 124–128. EDN: THNDUR.
16. Иванов В.М., Полянсков Р.А. Сорбция висмута (III) на силикагеле, модифицированном висмутолом I // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. 2006. Т. 47. № 6. С. 402–408.
17. Афзалетдинова Н.Г., Муринов Ю.И. Экстракция висмута дигексилсульфоксидом из азотнокислых растворов // Вестник Башкирского университета. 2018. № 3. С. 710–715. EDN: YOOWYX.
18. Епифоров А.В. Поведение золота и серебра в процессе автоклавного окисления сульфидных концентратов // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXVIII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Екатеринбург, 3–12 апреля 2023 г.). Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. С. 194–199.
19. Епифоров А.В. Химия высокотемпературного автоклавного окисления сульфидных концентратов // Современные технологии производства цветных металлов: материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 80-летию

С.С. Набойченко (г. Екатеринбург, 24–25 марта 2022 г.). Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2022. С. 51–58.

20 Patent no. 6641642, United States of America, B2 C22B 3/08. High temperature pressure oxidation of ore and ore concentrates containing silver using controlled precipitation of sulfate species / J.C. Gathje, G.L. Simmons; Newmont USA Limited; no. 10/032,118. Filed 21.12.2001; publ. 04.11.2003.

References

1. Thomas K.G. Pressure oxidation overview. *Developments in Mineral Processing*. 2005;15:346-369. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15015-7](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15015-7).
2. Balikov S.V., Gudkov S.S., Emel'yanov Yu.E., Bogorodskij A.V., Epiforov A.V., Boldyrev A.V., Dzgoev Ch.T. *Pressure oxidation of gold ores and concentrates*. Irkutsk: OAO «Irgiredmet»; 2016, 471 p. (In Russ.).
3. Nabojchenko S.S., Shneerson Ya.M., Kalashnikova M.I., Chugaev L.V. *Pressure hydrometallurgy of non-ferrous metals*. Ekaterinburg: *Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin*; 2009, vol. 2, 612 p. (In Russ.).
4. Ferron C.J. Recovery of gold as by-product from the base-metals industries. In: *Gold Ore Processing*. 2016;46:831-856. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15035-2](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15035-2).
5. Dreisinger D.B. Case study flowsheets: copper gold concentrate treatment. In: *Gold Ore Processing*. 2016;44:803-820. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15033-9](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15033-9).
6. Epiforov A.V., Bogorodskij A.V., Balikov S.V., Emel'yanov Yu.E., Kopylova N.V. Laboratory studies of high-temperature autoclave oxidation of polymetallic gold-bearing sulfide concentrates. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2012;1:116-119. (In Russ.). EDN: OOVJBZ.
7. Dzgoev C.T., Yevtushevich I.I., Schtoick S.G., Yepiforov A.V., Gudkov S.S., Yemilianov Y.E., Balikov S.V. Pressure oxidation pyrometallurgical technology of gold-bearing and lead and zinc sulfide concentrates undergoing combined treatment. In: *IMPC 2016 – 28TH International Mineral Processing Congress*. 11–15 September 2016, Québec. Québec: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum; 2016. Paper № 801. EDN: YCALZJ.
8. Evtushevich I.I., Dzgoev Ch.T., Epiforov A.V., Gudkov S.S., Emel'yanov Yu.E., Balikov S.V. Pox-pirometallurgical processing method for gold-bearing and lead-zinc concentrates. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2017;10(1):110-124. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0011>. EDN: YMRZVZ.
9. Smirnov K.M., Molchanova T.V., Anan'ev A.V., Akimova I.D., Ovcharenko E.V., Krylova O.K. Promising technology for reprocessing complex uranium ores from the Elkon deposit. *Atomic Energy*. 2017;122(6):309-314. (In Russ.). EDN: YTDGZH.
10. Shatalov V.V., Pirkovskij S.A., Smirnov K.M. Oxidation of pyrite by oxygen and concurrent leaching of uranium from ore under the conditions of an autogenous autoclave process. *Atomic Energy*. 2007;102(2):120-124. (In Russ.). EDN: IWDRHX.
11. Fleming C.A. Basic iron sulphate – a potential killer for pressure oxidation processing of refractory gold concentrates if not handled appropriately. *SGS Minerals Services. Technical Paper*. 2009;6. Available from: <https://www.sgs.ca/-/media/global/documents/technical-documents/sgs-technical-papers/sgs-min-tp2009-06-basic-iron-sulphate-in-pox-processing-of-refractory-gold.pdf> [Accessed 28th February 2024].
12. Bekbutaeva N.N., Sharipov H.T., Lukomskaya G.A., Bekbutaev A.N., Tashaliev F.U., Saparov A.R. Molybdenum extraction from sulfuric acid mother liquors after rhenium sorption. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2021;12. Available from: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12816> [Accessed 28th February 2024]. (In Russ.).
13. Bekbutaeva N.N., Sharipov H.T., Lukomskaya G.A., Bekbutaev A.N., Tashaliev F.U. Molybdenum extraction from sulfuric acid mother liquors after rhenium sorption. In: *Kompozitnye materialy na osnove tekhnogennykh othodov i mestnogo syr'ya: sostav, svoystva i primeneniye: materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Composite materials based on technogenic waste and local raw materials: composition, properties and application: materials of the International scientific and technical conference*. Tashkent, 16–17 September 2021. Tashkent: Saydana-print; 2021, p. 84-86. (In Russ.).
14. Epiforov A.V., Emelianov Yu.E., Kopylova N.V., Shketova L.E., Seleznev A.N., Mikhailova A.N., et al. Modern methods of non-ferrous metal extraction from technological solutions. *Analiz, dobycha i pererabotka poleznykh iskopaemykh: sbornik nauchnykh trudov (posvyashchen 150-letiyu instituta Irgiredmet) = Analysis, mining and processing of mineral resources: collected scientific papers (dedicated to the 150th anniversary of the Irgiredmet Institute)*. Irkutsk: "Irgiredmet"; 2021, p. 185-212. (In Russ.).
15. Mikhailova A.N., Faiberg A.A., Dementiev V.E., Mineev G.G., Bonch-Osmolovskaya E.A. Biogenic hydrogen sulfide production. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;1:124-128. (In Russ.). EDN: THNDUR.
16. Ivanov V.M., Polyanskov R.A. Sorption of bismuth(III) ions by bismuthol I immobilized on silica gel. *Moscow University Chemistry Bulletin*. 2006;47(6):402-408. (In Russ.).
17. Afzaletdinova N.G., Murinov Yu.I. Extraction of bismuth by digexilsulphoxide from nitric acid solutions. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*. 2018;23(3):710-715. (In Russ.). EDN: YOOWYX.
18. Epiforov A.V. Behavior of gold and silver during pressure oxidation of sulfide concentrates/. In: *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya: materialy XXVIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Scientific principles and ore and technogenic raw material processing practice: materials of the 28th International scientific and technical conference*. 3–12 April 2023, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural State Mining University; 2023, p. 194-199. (In Russ.).

19. Epiforov A.V. Chemistry of high-temperature autoclave oxidation of sulfide concentrates. In: *Sovremennye tekhnologii proizvodstva cvetnyh metallov: materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 80-letiyu S.S. Nabojchenko = Modern technologies of non-ferrous metals production: materials of the International scientific conference dedicated to 80th anniversary of S.S. Nabojchenko*. 24–25 March 2022, Ekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; 2022, p. 51-58. (In Russ.).
20. Gathje J.C., Simmons G.L. *High temperature pressure oxidation of ore and ore concentrates containing silver using controlled precipitation of sulfate species*. Patent USA, no. 6641642; 2003.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**Епифоров Александр Владимирович,**

к.т.н.,
старший научный сотрудник лаборатории металлургии,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, г. Иркутск, Бульвар Гагарина, 38, Россия
✉ epiforov@irgiredmet.ru

Баликов Станислав Васильевич,

д.т.н.,
директор бизнес-центра,
главный научный сотрудник Иркутского
научно-исследовательского института
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 38, Россия
balikov@irgiredmet.ru

Шипнигов Антон Андреевич,

младший научный сотрудник лаборатории металлургии,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, г. Иркутск, Бульвар Гагарина, 38, Россия
shipn.anton@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**Alexander V. Epiforov,**

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of the Metallurgy Laboratory,
Irkutsk Research Institute of Precious
and Rare Metals and Diamonds,
38 Gagarin Blvd, Irkutsk 664025, Russia
✉ epiforov@irgiredmet.ru

Stanislav V. Balikov,

Dr. Sci. (Eng.),
Director of the Business Center,
Chief Researcher of Irkutsk Research Institute
of Precious and Rare Metals and Diamonds,
38 Gagarin Blvd, Irkutsk 664025, Russia
balikov@irgiredmet.ru

Anton A. Shipnigov,

Junior Researcher at the Metallurgy Laboratory,
Irkutsk Research Institute of Precious
and Rare Metals and Diamonds,
38 Gagarin Blvd, Irkutsk 664025, Russia
shipn.anton@yandex.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготов-
ку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.*

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 02.07.2024 г.; одобрена
после рецензирования 30.07.2024 г.; принята к пу-
бликации 10.08.2024 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all
the co-authors.*

Information about the article

The article was submitted 02.07.2024; approved
after reviewing 30.07.2024; accepted for publication
10.08.2024.