

Разработка методики кавитационной обработки золотосодержащих руд в щелочной среде в целях попутного извлечения платиноидов из руд чернослацевого типа

©2022 А. И. Фурсов[✉], Ю. Ю. Янникова, Л. Ю. Зыкова

*Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: Важнейшей задачей совершенствования технологии извлечения золота и металлов платиновой группы (МПП) является изучение их поведения при кавитационном воздействии на руды черносланцевой малосульфидной формации. Для решения данной научной проблемы в качестве исследуемого материала использовался концентрат для цианирования месторождения «Голец Высочайший».

Методика: Суперизмельчение и растворение в щелочных растворах выполнялось на кавитационном генераторе-диспергаторе роторного типа (Россия) с постоянным замером температуры, времени и pH среды. Определение ценных компонентов проводилось на комплексе атомно-абсорбционного спектрометра КВАНТ-Z.ЭТА-1 (ООО «Кортэк», Россия). Электронно-зондовый микроанализ с растровой электронной микроскопией выполнялся на электронном микроскопе JSM-6510LV (JEOL Ltd., Япония) с использованием системы микроанализа INCA Energy 250 (Oxford Instruments, Великобритания). Пробоподготовка эксперимента общепринятая – в смеси азотной и соляной кислот («царская водка»), физические характеристики по ГОСТ 5180-2015. Измерение водородного показателя осуществлялось на pH-мере pH-150 МИ (НПО «Измерительная техника», Россия).

Результаты и их обсуждение: Получены данные по растворимости золота и МПП в щелочной среде при кавитационной обработке. При суммарной кавитационной обработке длительностью 25.5 минут платина перешла в раствор на 50% (содержание в растворе 2.40 г/т при исходном содержании 4.81 г/т), палладий на 76–87% (содержание в растворе 4.67–4.00 г/т при исходном содержании 5.27 г/т) и золото на 22–30% (содержание в растворе 0.35–0.48 г/т при исходном содержании 1.59 г/т).

Заключение: Золото при кавитационной обработке в раствор практически не переходит, при этом МПП показывают хорошую тенденцию по растворимости. Применение данного метода в щелочной среде позволит доизвлекать МПП с одновременной нейтрализацией цианидов из хвостов цианирования. Сами хвостохранилища могут рассматриваться как техногенные месторождения платины и палладия. Определены оптимальные показатели по расходу щелочи (134 г на 10 л пульпы) и времени обработки (17–19 минут). Рассчитана тепловая мощность кавитационной установки (7.7 кВт).

Ключевые слова: благородные металлы, наноразмерное золото, высокоуглеродистые формации, двойная упорность, суперизмельчение, кавитация, природоподобные технологии, черные сланцы
Источник финансирования: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90079 "Разработка теоретических основ технологии извлечения наноразмерного золота из руд связанных с высокоуглеродистыми сланцами".



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Фурсов Антон Иванович, e-mail: anton87f@gmail.com

Для цитирования: Фурсов А. И., Янникова Ю. Ю., Зыкова Л. Ю. Разработка методики кавитационной обработки золотосодержащих руд в щелочной среде в целях попутного извлечения платиноидов из руд чернослацевого типа // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2022. №2. С. 46–53. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2022.2/9278>

Введение

Изучение поведения золота и металлов платиновой группы при кавитационном воздействии на руды чернослацевой малосульфидной формации является важнейшей задачей совершенствования технологии их извлечения. Ранее были опубликованы подобные результаты для нейтральной и кислой сред [1]. В данной работе отражаются результаты по экспериментам в щелочной среде с максимально высоким уровнем рН (~13–14). Щелочная среда с одной стороны является необходимым условием процесса цианирования (проводится с добавлением гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$), а с другой – МПП более склонны к растворению в щелочной среде. Влияние кавитации при этом совершенно не изучено. На этом этапе работы проводились по следующему алгоритму: 1) подбор оптимального уровня концентрации NaOH ; 2) изучение динамики изменения содержаний золота и МПП; 3) изучение активности углерода; 4) изучение остаточных уровней содержания драгметаллов в кеке.

Кавитационные эффекты возникают при резком сбросе давления (~ 300 атм.) в жидкостях, когда происходит декомпрессия, и жидкость вскипает с образованием микропузырьков вакуума, которые схлопываясь создают микроударные волны, разрушая частицы, на поверхности которых они образуются. Степень диспергации при этом не ограничена, в связи с чем вскрываются наноразмерные частицы, в том числе кластерной организации [2].

Был произведен анализ химизма растворения золота и некоторых платиноидов в щелочной среде. Поскольку кавитационное воздействие в щелочной среде практически не изучено, для внесения корректив в технологический процесс, особый акцент делался и на изучение растворимости основных компонентов матрицы руды (железа, оксида кремния и др.). Так как представленные пробы содержат большое количество соединений железа (в основном пирит, арсенопирит и т.д.) было изучено его поведение в щелочной среде. Оксид железа (магнетит) и дисульфид железа FeS_2 (пирит, марказит) взаимодействуют с щелочами. Реакция протекает в расплаве, при этом образуются соответствующие соли (ферриты). Гидроокись железа $\text{Fe}(\text{OH})_2$ в избытке щелочи не растворяется.

Щелочи с металлическим золотом не взаимодействуют. Реакция возможна в расплаве при присутствии нитратов щелочных металлов (например, NaNO_3).

Для платины известны гидроксиды $\text{Pt}(\text{OH})_2$ и $\text{Pt}(\text{OH})_4$. Получают их при щелочном гидролизе соответствующих хлороплатинатов. Реагирует с избытком

щелочей с образованием гидроксоплатинатов.

Согласно [3] рутений растворяют в воде после щелочно-окислительного сплавления с KOH в присутствии окислителей (Na_2O_2 , KNO_3) с образованием легко растворимого рутената калия K_2RuO_4 и перрутената калия KRuO_4 . Осмий растворяют в воде после щелочно-окислительного сплавления с NaOH с образованием растворимого осмата натрия Na_2OsO_4 .

При обычных условиях палладий не реагирует с щелочами. При сплавлении в присутствии окислителей палладий и платина переходят в производные анионных комплексов.

В водных растворах щелочей кремний растворяется с образованием солей кремниевой кислоты. При этом щелочь окисляет кремний. Образовавшийся метасиликат натрия Na_2SiO_3 (жидкое стекло) – хорошо растворим в воде. Разлагается в горячей воде с выделением NaOH и SiO_2 . Гель кремниевой кислоты обладает сильными сорбционными свойствами на золото [4].

Кроме того, было изучено поведение благородных металлов с перекисью водорода при кавитационной обработке (KO , cavitation treatment (CT)). Золото при избытке свободного кислорода в обычных условиях с ним не реагирует, однако известны оксиды золота Au_2O и более устойчивого Au_2O_3 . Платина при нагревании реагирует с кислородом с образованием летучих оксидов. Выделены оксиды платины, в которых платина проявляет степени окисления II (PtO) и IV (PtO_2). Поэтому применение кислород содержащих соединений не желательно, особенно это касается благородных металлов наноразмерной шкалы [5].

Кавитационное воздействие на руды благородных металлов открывает новые возможности по их извлечению по принципу природоподобных технологий, для которых очень важным представляется понимание геологических условий накопления и локализации руд.

Геология месторождения «Голец Высочайший»

Месторождение «Голец Высочайший» расположено на территории Байкало-Патомского нагорья в пределах Маракано-Тунгусской мегасинклинали. Последняя сложена терригенно-карбонатными углеродистыми породами, метаморфизованными в условиях зеленослацевой фации. Месторождение локализовано в висячем крыле асимметричной Каменской антиклинали S-образной формы в поперечном сечении, протягивающейся в широтном направлении. Главной особенностью месторождения «Голец Высочайший» является [6] развитие межслоевых зон сульфидизации (пирит, пирротин), в том числе и золотоносных. Золоторудные тела тяготеют к послонным зонам межслоевого скольжения в породах хомолхинской свиты.

Золоторудные месторождения Бодайбинского рудного района заключены в мощной (несколько км) толще рифей-вендских углеродсодержащих карбонатно-терригенных отложений. Золото концентрируется на нескольких стратиграфических уровнях представленных хомолхинской и вачской свитами. К терригенным отложениям хомолхинской свиты ри-

фейского возраста приурочено крупнейшее месторождение России – Сухой Лог, а также его аналог – «Голец Высочайший». Характерными компонентами отложений хомолхинской свиты являются линзовидные прослои и послойная вкрапленность пирротина и пирита с отчетливо выраженным литолого-стратиграфическим контролем их распространения. Месторождение «Голец Высочайший» приурочено к наиболее крупному сгущению сульфидных прослоев в углеродсодержащих хлорит-кварц-серицитовых филлитовидных сланцах нижней части хомолхинской свиты. Содержание сульфидов в рудоносной толще составляет 5 мас. %, самородное золото заключено в сульфидных прослоях. По данным предыдущих исследователей [7], основанных на закономерностях в распределении изотопов серы, сульфидные рудоносные отложения месторождения формировались гидротермально-осадочным путем. Первичная золотосодержательность сульфидных осадков предполагается по аналогии с соседними месторождениями Сухой Лог и Вернинское. Распределение Au, Ag и углеродистого вещества в сульфидсодержащей толще месторождения «Голец Высочайший» имеет субпластовый характер, отражающий их накопление в осадочном процессе.

Отложения вачской свиты занимают центральную часть территории. В структурном отношении они слагают крылья антиклинальных складок и ядро Ложковой синклинали. Свита сложена черными высокоуглеродистыми и серицит-кварцевыми сланцами (80–95%) с маломощными прослоями углеродистых кварцевых песчаников. Для низов разреза характерным является грубое переслаивание пород с мощностью прослоев 0.5 м и более. Мощность свиты колеблется от 400 м до 600 м в зависимости от структурного положения. По литологическим особенностям пород (однородный состав, черная окраска, высокое содержание углеродистого вещества), вачская свита резко выделяется в разрезе и является маркирующей стратиграфической единицей региона.

Вачская свита расчленена на две подсвиты: верхнюю и нижнюю. *Нижняя подсвита (первый горизонт)*, характеризуется высокоуглеродистыми кремнистыми сланцами с прослоями темно-серых кварцитовидных песчаников. *Второй горизонт* сложен черными высокоуглеродистыми филлитами и серицит-кварцевыми сланцами с редкими прослоями кварц-серицитовых песчаников. В пределах *Верхней подсвиты* также выделяется два горизонта: *первый горизонт*, преимущественно представлен переслаиванием темно-серых кварцитов и высокоуглеродистых филлитов, *второй горизонт* сложен черными высокоуглеродистыми филлитами и серициткварцевыми сланцами.

В пределах месторождения установлены четыре структурных маркера [6], указывающих на неоднократность деформационных процессов: 1) формирование складчатости субширотной ориентировки, кливажа осевой поверхности и последующее его трансформирование в сланцеватость; 2) формирование кре-

нуляционного кливажа; 3) межслоевые подвижки (срывы), сопровождающиеся межслоевыми складками волочения, параллельными микротрещинами, а также отполированными зеркалами скольжения; 4) формирование крупных кварцевых жил и прожилков, занимающих секущее положение по отношению к основным плоскостным структурным элементам.

Породы претерпели метаморфические преобразования в условиях фации зеленых сланцев, в процессе которых происходила их перекристаллизация, перераспределение сульфидов и золота с сохранением слоистой текстуры пород. В содержании пороодообразующих компонентов между рудной залежью и окружающими породами нет значимых различий, что свидетельствует об отсутствии или о слабом проявлении метасоматических изменений пород, связанных с рудообразованием. Метаморфические процессы в отложении хомолхинской свиты сопровождалась замещением ильменита рутилом, пирротина пиритом, а также изменением состава хлоритов и карбонатов с увеличением их железистости, эти процессы регулировались фугитивностью кислорода и углекислого газа. Метаморфические преобразования по данным изучения флюидных включений протекали в температурном интервале 230–510°C при участии окисленных углекислотно-водных флюидов (CO₂/CH₄ до 17) с соленостью 7–12 мас. %-экв. NaCl и восстановленных (CO₂/CH₄ < 0.3) метан-азотных флюидов с соленостью 11–13 мас. %-экв. NaCl [7].

Методика изучения

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной базе геологического факультета и центре коллективного пользования научным оборудованием Воронежского государственного университета. Анализ исходных проб и продуктов обогащения проводился с использованием спектрометра атомно-абсорбционного Квант-Z ЭТА-Т с электротермической атомизацией (ААС ЭТА) в графитовом кювете (ООО «Кортэк», Россия), с коррекцией спектральных помех способом обратного эффекта Зеemана. Детально метод описан в работе [1]. Статистический анализ данных проведен с помощью программы Statistica 10.0.

Для подготовки проб к приборным исследованиям применялись следующие апробированные методики: инструкция НСАМ 170-с «Пробирно-спектральное определение платины, палладия, родия и золота в сульфидных медно-никелевых рудах» 1980 г. и инструкция НСАМ 162-С «Спектральные методы. Золото и серебро. Пробирно-атомно-абсорбционное определение малых содержаний золота и серебра в минеральном сырье» 1979 г.

С целью определения содержаний золота, платины и палладия в исходной пробе руды для перевода в раствор ценных компонентов в данной работе был использовано микроволновое разложение (МР) проб, позволяющее по сравнению с классической схемой растворения (в «царской водке»), полностью растворить матрицу руды и тем самым достичь более досто-

верных результатов. Микроволновое разложение по методике «Микроволновая система пробоподготовки МС-6. РЭ» и «Контейнер КЖ-180. РЭ. Приложение 2. Методики разложения образцов. Примеры» по примеру разложения для ильменита. Алгоритм заключается в следующем. Масса двух навесок по 0.2 г растворялись в смеси кислот соляной, азотной и плавиковой в соотношении 3:1:1 в три стадии 4 мин при 140 °С 10 атм., 4 мин при 180 °С 18 атм. и 5 мин 220 °С 28 атм.

Обработка материала производилась на кавитационной установке роторного типа. Для этого пробу массой 2 кг естественной влажности смешивали с 10 литрами воды из системы центрального водоснабжения (рН ≈ 6–8, общая минерализация не более 1 г/л). Соотношение Т:Ж составило 1:5. Подготовленную пульпу из резервуара подавали в кавитационную установку при постоянном замере температуры, уровня рН, времени. Обработка прекращалась при достижении температуры раствора ~70 °С. Для поддержания щелочной среды добавлялся гидроксид натрия NaOH.

В связи с тем, что растворы кавитационной обработки пробы получаются щелочными, а анализ по методу ААС ЭТА проводится на солянокислом растворе, возникает необходимость изменения рН раствора и вместе с тем перевода раствора через точку выпадения гидроокислов железа. Была принята следующая методика. Точно измеренный объем раствора, который сохраняет свойства основного образца – аликвоту доводили выпариванием до состояния влажных солей, затем приливалась смесь кислот («царская водка») с последующим 2 часовым кипячением. Полученный раствор разбавлялся 1 М раствором соляной кислоты до определённого объема. Аликвота полученного раствора направлялась на анализ методом ААС ЭТА.

Ход эксперимента, результаты и их обсуждение

Для проведения исследований по кавитационной обработке в щелочной среде взята технологическая проба питания цианирования с ГОК «Высочайший». По данным пробного анализа исходное содержание золота в пробе 12.6 г/т.

В процессе кавитации после каждого цикла отбиралась проба пульпы, декантировалась на раствор и кек с последующим анализом их методом ААС ЭТА. В итоге получен график зависимости содержания золота и ЭПГ от времени КО в жидкой и твердой фазах (табл. 1 и 2). Среднее время цикла 5.5–6.0 мин. Было отмечено, что раствор неустойчив на открытом воздухе. Происходит взаимодействие раствора (щелочи) с кислородом, углекислым газом и другими компонентами воздуха. Щелочность уменьшается, выпадает осадок белого цвета не растворимый ни в растворе соляной кислоты HCl, ни в «царской водке». Полученные нерастворимые соли направлены на растровый электронный микроскоп с рентгеноспектральным микроанализом для анализа морфологии и элементного состава, который показал, что представленный образец представляет собой серу (98%).

Табл. 1. Содержание платины, палладия и золота в растворах кавитационной обработки
[Table 1. The content of platinum, palladium and gold in cavitation treatment solutions]

№ КО [No. CT]	Время, мин [Time, min]	C _{Pt} , г/т [C _{Pt} , g/t]	C _{Pd} , г/т [C _{Pd} , g/t]	C _{Au} , г/т [C _{Au} , g/t]
1	6.0	0.49	1.12	0.30
2	5.5	0.41	1.54	0.48
3	5.5	1.43	4.68	0.39
4	5.5	2.40	3.46	0.26
5	6.0	2.40	4.00	0.35

Табл. 2. Содержание платины, палладия и золота в кеке после кавитационной обработки
[Table 2. The content of platinum, palladium and gold in the cake after cavitation treatment]

№ КО [No. CT]	Время, мин [Time, min]	C _{Pt} , г/т [C _{Pt} , g/t]	C _{Pd} , г/т [C _{Pd} , g/t]	C _{Au} , г/т [C _{Au} , g/t]
1	6.0	4.32	3.69	4.51
2	5.5	4.4	3.27	4.33
3	5.5	3.38	0.13	4.42
4	5.5	2.41	1.35	4.55
5	6.0	2.41	0.81	4.46

Исходное содержание платины, палладия и золота, определённое методом ААС ЭТА с микроволновым разложением пробы составило 4.81, 5.27 и 1.59 г/т соответственно.

На рис. 1 так же приведена зависимость содержания золота от времени КО в солянокислом растворе, полученная в предыдущих экспериментах [1]. Как видно из графика растворимость золота в щелочной среде по сравнению с солянокислой минимальна.

Суммарное время кавитационной обработки составило 25.5 мин (табл. 1 и 2). Платина перешла в раствор на 50% (содержание в растворе 2.40 при исходном значении 4.81 г/т), палладий на 76–87% (содержание в растворе 4.67–4.00 при исходном значении 5.27 г/т) и золота на 22–30% (содержание в растворе 0.35–0.48 при исходном значении 1.59 г/т).

Сорбционная активность углерода при КО в щелочной среде отмечена только для палладия, которая характеризуется уменьшением содержания его в растворе при избыточном времени кавитационной обработки.

Оптимальное время КО для МПГ составляет 17–19 минут (3–4 цикла).

Уровень рН поддерживался на уровне 11 путем добавления гидроксида натрия NaOH. Подобран оптимальный уровень концентрации NaOH. Для 10 литров раствора и 2 кг пробы оптимальный расход щелочи составил 134 г.

Явление кавитации сопровождается выделением теплоты. Этот эффект используют в кавитационных теплогенераторах [8, 9]. Поэтому в процессе проведения КО проводился мониторинг изменения температуры (табл. 3).

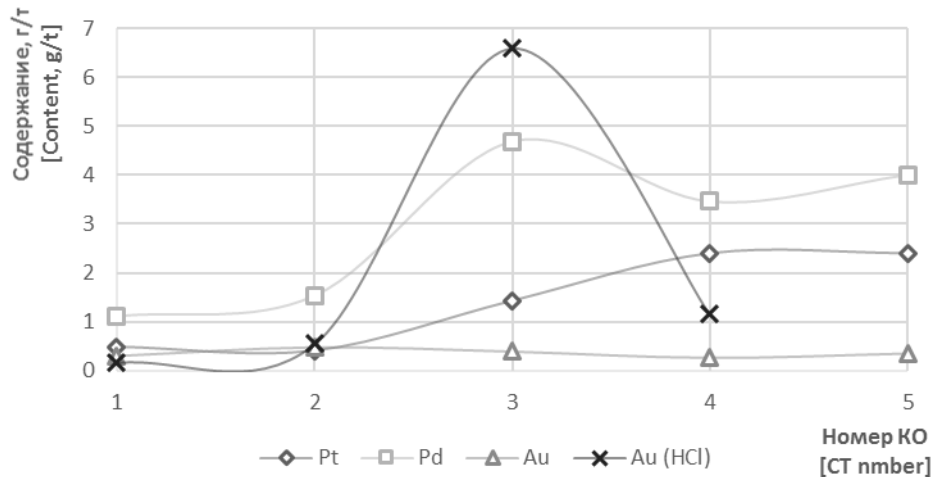


Рис. 1. Содержание платины, палладия и золота в растворах кавитационной обработки, г/т. [Fig. 1. Content of platinum, palladium, and gold in cavitation treatment solutions, g/t.]

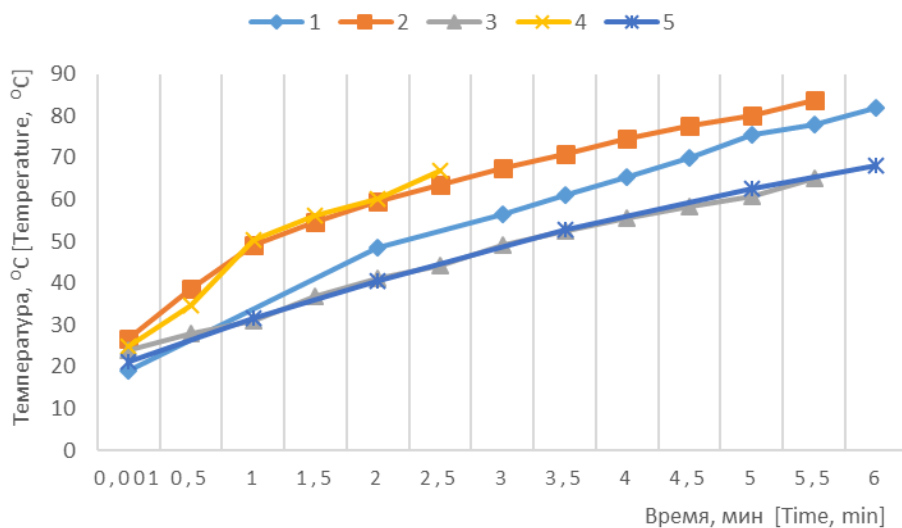


Рис. 2. Термограмма кавитационной обработки (10 л при Т:Ж = 1:5). [Fig. 2. Thermogram of cavitation treatment (10l at S:L = 1:5).]

Табл. 3. Термограмма кавитационной обработки [Table 3. Thermogram of cavitation treatment]

Время, мин [Time, min]	№ КО [No. CT]				
	1	2	3	4	5
0	19	26.6	24	24.8	21.3
0.5		38.6	28	34.8	
1		49	31.1	50.2	31.6
1.5		54.6	36.8	56	
2	48.6	59.5	41.1	60	40.4
2.5		63.6	44.2	67	
3	56.6	67.5	49.1		
3.5	61.1	71	52.4		52.8
4	65.5	74.5	55.6		
4.5	70.1	77.7	58.3		
5	75.4	80	60.6		62.5
5.5	78	83.8	65		
6	82				68.1

На основании табл. 3 и рис. 2 можно сделать следующие выводы. В процессе КО выделилось количество теплоты 2 760 КДж (нагрев аппарата, пульпы и окружающего воздуха). При этом тепловая мощность, т.е. количество теплоты, переданное системе за время эксперимента, составило 7.7 кВт.

Заключение

Золото при кавитационной обработке в щелочной среде в раствор практически не переходит. Содержание его в растворе 0.35–0.48 при исходном значении 1.59 г/т, что составляет 22–30%.

МПГ показывают хорошую тенденцию по растворимости. Платина перешла в раствор на 50% (содержание в растворе 2.40 при исходном значении 4.81 г/т), палладий на 76–87% (содержание в растворе 4.67–4.00 при исходном значении 5.27 г/т).

Актуальным для извлечения МПГ является материал, получаемый после извлечения золота цианированием – хвосты цианирования. В настоящее время

этот продукт нейтрализуется от действия цианидов и направляется в хвостохранилища, в дальнейшей переработке не участвует.

Таким образом, применение кавитационной обработки в щелочной среде позволит доизвлекать МПП с одновременной нейтрализацией цианидов из хвостов цианирования. Сами хвостохранилища могут рассматриваться как техногенные месторождения платины и палладия.

Оптимальный расход щелочи (гидроксид натрия NaOH) составил 134 г на 10 л воды. Оптимальное время кавитационной обработки для МПП составляет 17–19 минут (3–4 цикла). Стоит учесть, что с целью повышения извлечения платины время КО можно увеличить.

Явление кавитации сопровождается выделением теплоты. В процессе КО выделилось количество теплоты 2 760 КДж (нагрев аппарата, пульпы и окружающего воздуха). Данное явление необходимо учитывать при проектировании технологической линии и можно использовать, например, для обогрева помещений в суровых климатических условиях. При этом, тепловая мощность составила 7.7 кВт.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Янникова Ю. Ю., Фурсов А. И., Зыкова Л. Ю. Геология и технологические особенности золоторудного месторождения «Красное» (Иркутская область) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2021. № 2. С. 52–63. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.2/3488>
2. Ненахов В. М., Золотарева Г. С., Дубков А. А. Черные сланцы и их благороднометалльный потенциал: современное состояние изученности, технологические реалии и перспективы // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2021. №1. С. 53–64. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3337>
3. Гинзбург С. И., Гладышевская К. А., Езерская Н. А. Руководство по химическому анализу платиновых металлов и золота. Отв. ред. О. Е. Звягинцев. Акад. наук СССР. Ин-т общей и неорганич. химии им. Н. С. Курнакова. -Москва: Наука, 1965. 314 с.
4. Методика НСАМ 131-С. Спектральные методы. Золото. Методика количественного химического анализа. Определение золота в горных породах, рудах и продуктах их переработки пламенным атомно-абсорбционным методом после экстракции изоамиловым спиртом. Москва, 2010.
5. Матвиенко В. Н., Ненахов В. М., Калашников Ю. Д., Левин В. Л. Роль природных кластеров благородных металлов как источника рудного вещества при формировании месторождений // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2018. № 3. С. 36–49
6. Ванин В.А., Мазукабзов А.М. Структура золоторудного месторождения голец высочайший (Северное Забайкалье) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2021. №1. С. 60–75. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-1-0512>
7. Онищенко С. А., Сокерина Н. В. Особенности формирования золоторудного Черносланцевого месторождения Голец Высочайший (Бодайбинский рудный район) // *Геология рудных месторождений*. 2021. Т. 63. № 2. С. 154–173. DOI 10.31857/S0016777021020040.
8. Нефедов Ю. И., Стороженко В. А., Брагин С. С. Кавитационный гидроударный генератор тепла // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2012. №4 (98). С. 33-38
9. Вед В., Никольский О., Олейник О., Липеев В. Исследование кавитационного теплогенератора и метод контроля эффективности его работы // *ВЕЖИПТ*. 2017. №8 (88). С. 22–28
10. Сокерина Н.В., Онищенко С.А., Исаенко С.И. Флюидный режим формирования золоторудного месторождения Голец Высочайший (Ленский золотоносный район) // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2016. №7 (259). С. 3–9. DOI: 10.19110/2221-1381-2016-7-3-9

Development of a technique for the cavitation treatment of gold-bearing ores in an alkaline environment for the purpose of the associated extraction of platinoids from black shale ores

©2022 A. I. Fursov[✉], Yu. Yu. Yannikova, L. Yu. Zykova

*Voronezh State University,
1 Universitetskaya pl., Voronezh, 394018, Russian Federation*

Abstract

Introduction: The most important task of improving the technology of extracting gold and platinum group metals (PGM) is the study of their behaviour under cavitation impact on black shale type and low-sulphide formations. In order to solve this problem, a concentrate for the cyanidation of the Golets Vysochaishy deposit was used as the test material.

Methods: Supergrinding and dissolution in alkaline solutions was carried out on a cavitation rotary-type dispersant generator (Russia) with constant measurement of temperature, time, and pH of the medium. Determination of valuable components was carried out using atomic absorption spectrometer KVANT-Z.ETA-1 (OOO Kortek, Russia). Electron probe microanalysis with scanning electron microscopy was performed using JSM-6510LV electron microscope (JEOL Ltd., Japan) with an INCA Energy 250 microanalysis system (Oxford Instruments, UK). Sample preparation of the experiment was according to generally accepted method: in a mixture of nitric and hydrochloric acids (*aqua regia*), physical characteristics according to GOST 5180-2015. The pH measurement was carried out using a pH-150 MI pH-meter (NPO Izmeritelnaya Tekhnika, Russia).

Results and discussion: Data on the solubility of gold and PGM in an alkaline medium during cavitation treatment were obtained. During total cavitation treatment for 25.5 min, 50% of platinum dissolved in the solution (content in the solution was 2.40 g/t, the initial content was 4.81 g/t), 76–87% of palladium dissolved in the solution (content in the solution was 4.67–4.00 g/t, the initial content was 5.27 g/t) and 22–30% of gold dissolved in the solution (content in the solution was 0.35–0.48 g/t, the initial content was 1.59 g/t).

Conclusions: During cavitation treatment gold practically did not dissolve in the solution, while PGM showed good solubility. The application of this method in an alkaline environment will allow to recover PGM with simultaneous neutralization of cyanides from cyanidation tailings. The tailings storages can be considered as technogenic deposits of platinum and palladium. The optimal parameters for alkali consumption (134 g per 10 l of pulp) and processing time (17–19 min) were determined. The thermal power of the cavitation unit was calculated (7.7 kW).

Keywords: noble metals, nanoscale gold, high-carbon formations, double hardness, super-grinding, cavitation, nature-like technologies, black shales

Funding The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 20-35-90079 "Development of the theoretical foundations of the technology for extracting nanosized gold from ores associated with high carbonaceous shales".

For citation: Fursov A. I., Yannikova Yu. Yu., Zykova L. Yu. Development of a technique for the cavitation treatment of gold-bearing ores in an alkaline environment for the purpose of the associated extraction of platinoids from black shale ores. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya –Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 2, pp. 46–53. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2022.2/9278>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Anton I. Fursov, e-mail: anton87f@gmail.com

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Yannikova Yu. Yu., Fursov A. I., Zykova L. Yu. Geology and technological features of the Krasnoe gold ore field (Irkutsk Region). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 2, pp. 52–63. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.2/3488> (in Russ.).
2. Nenakhov V. M., Zolotareva G.S., Dubkov A. A. Black shales of the Sukhoi Log type and their noble metal potential: current state of study, technological realities and prospects. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 1, pp. 53–64. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3337> (in Russ.).
3. Ginzburg S. I., Gladyshevskaya K. A., Ezerskaya N. A. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu platinovykh metallov i zolota* [Guidelines for the chemical analysis of platinum metals and gold]. Ed. O. E. Zvyagintsev. Acad. sciences of the USSR. Institute of general and inorganic. chemistry them. N. S. Kurnakova. Moscow, Nauka publ., 1965. 314 p. (In Russ.).
4. Metodika NSAM 131-S Spektralnye metody. Zoloto. Metodika kolichestvennogo himicheskogo analiza opredelenie zolota v gornykh porodakh, rudakh i produktakh ikh pererabotki plamen-nym atomno-absorbtsionnym metodom posle ekstrakcii izoami-lovym spirtom. [Technique NSAM 131-C Spectral methods. Gold. Quantitative chemical analysis technique for the determination of gold in rocks, ores and products of their processing by the flame atomic absorption method after extraction with isoamyl alcohol]. Moscow, 2010. (In Russ.).
5. Matvienko V. N., Nenakhov V. M., Kalashnikov Yu. D., Levin V. L. The role of natural clusters of noble metals as a source of ore matter in the formation of deposits *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2018, no. 3, pp.36–49. (in Russ.).
6. Vanin V.A., Mazukabzov A.M., Structure of the Golets Vysochaishy gold deposit (Northern Transbaikalia). *Geodynamics & Tectonophysics*, 2021, no.12 (1), pp. 60–75. DOI:10.5800/GT-2021-12-1-0512 (in Russ.).
7. Onishchenko S. A., Sokerina N. V. Osobennosti formirovaniya zolotorudnogo Chernoslantsevogo mestorozhdeniya Golets Vysochaishii (Bodaibinskii rudnyi raion) [Onishchenko S. A., Sokerina N. V. Peculiarities of the formation of the gold-bearing black shale deposit Golets Vysochaishy (Bodaibo ore district)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii – Geology of ore deposits*, 2021, (63), no. 2, pp. 154–173. DOI 10.31857/S0016777021020040. (In Russ.).
8. Nefedov Yu. I., Storozhenko V. A., Bragin S.S. Kavitatsionnyi gidroudarnyi generator tepla [Cavitation hydropercussion heat generator]. *Energoberezhenie. Energetika. Ergoaudit – Energy saving. Energy. Energy audit*, 2012, no. 4 (98), pp. 33–38. (in Russ.).
9. Ved V., Nikol'skii O., Oleinik O., Lipeev V. Issledovanie kavitatsionnogo teplogeneratora i metod kontrolya effektivnosti ego raboty [Issledovanie kavitatsionnogo teplogeneratora i metod kontrolya effektivnosti ego raboty]. *Vostochno-evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii – East european journal of advanced technologies*, 2017, no.8 (88), pp. 22–28. (in Russ.).
10. Sokerina N., Onishchenko S., Isaenko S.. Fluid formation mode of the Golets Vysochayshy gold field (Lensky gold region). *Vestnik of Institute of Geology of Komi Science Center of Ural Branch RAS*, 2016, no. 7, pp. 3–9. DOI : 10.19110/2221-1381-2016-7-3-9. (in Russ.)

Фурсов Антон Иванович – аспирант геологического факультета, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; E-mail: anton87f@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0665-2467>

Янникова Юлия Юрьевна – аспирант геологического факультета, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; E-mail: miss.yannikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3872-9115>

Зыкова Лилия Юрьевна, аспирант геологического факультета, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; E-mail: lili.yannikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2383-0723>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Anton I. Fursov – postgraduate student of the Faculty of Geology, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; E-mail: anton87f@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0665-2467>

Yulia Y. Yannikova – postgraduate student of the Faculty of Geology, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; E-mail: miss.yannikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3872-9115>

Lilia Y. Zykova – postgraduate student of the Faculty of Geology, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; E-mail: lili.yannikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2383-0723>

All authors have read and approved the final manuscript.