

**Геология и технологические особенности
золоторудного месторождения «Красное» (Иркутская область)**

©2021 Ю. Ю. Янникова, А. И. Фурсов[✉], Л. Ю. Зыкова

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

Аннотация

Введение: В связи с вовлечением в переработку месторождений с относительно низкими содержаниями золота, возникает первоочередная задача модернизации существующей технологии обогащения руд суходожского типа, позволяющая обеспечить снижение бортового содержания, а значит капитализацию проектируемых предприятий. Эта технология предполагает суперизмельчение с помощью кавитации.

Методика: Суперизмельчение в нейтральных и солянокислых растворах выполнялось на кавитационной установке роторного типа с постоянным замером температуры, времени и pH среды. Определение ценных компонентов проводилось на комплексе спектрометра атомно-абсорбционного КВАНТ-Z.ЭТА-1 (ООО «Кортэк», Россия), силикатный анализ на рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 Tiger (Bruker AXS GmbH, Германия), электронно-зондовый микроанализ с растровой электронной микроскопией на электронном микроскопе JSM-6510LV (JEOL Ltd., Япония) и системе микроанализа INCA Energy 250 (Oxford Instruments, Великобритания), пробоподготовка общепринятая в смеси кислот (царская водка), гранулометрический состав по ГОСТ 12536-2014, физические характеристики по ГОСТ 5180-2015.

Результаты и обсуждение: Над двумя пробами, представляющими собой продукты различных вариантов технологического передела (хвосты сорбции и флотации), до и после кавитационной обработки в нейтральной и кислой средах проводились исследования по определению кинетики извлекаемости ценных компонентов. По результатам этих экспериментов получены графики изменения гранулометрического состава в процессе кавитации, а так же степень влияния кавитационных процессов на извлекаемость драг металлов (золото и платина).

Заключение: Руды месторождения Красное формировались в условиях апвеллинговых фаций на пассивной континентальной окраине. В результате сформировался комплекс с повышенными содержаниями органического углерода. Он имеет как терригенное, так и аквагенное происхождение. Кавитация позволяет, за счет вскрытия наноразмерного золота в процессе суперизмельчения в хлоридной среде, повысить его извлекаемость, а так же обеспечить переход платины в раствор. Вместе с тем возникает проблема –повышение активности углерода.

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: 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>

Введение

Месторождение «Красное» в настоящее время готовится к постановке на баланс силами одной из горнодобывающих компаний, которая проводит комплекс геологоразведочных работ с подсчетом запасов для капитализации и дальнейшей разработки. В этой связи, оно представляет большой интерес, так как находится на фланге известного месторождения «Голец Высочайший», освоение которого открытым способом показало высокую рентабельность.

Капитализация, в первую очередь, зависит от объемов поставленных на баланс запасов ценного компонента. При подсчете запасов на месторождении важным параметром является бортовое содержание, которое зависит от многих факторов, в том числе от типа руды, среднего содержания, извлекаемости и других показателей. Бortовое содержание характеризует уровень минимальных концентраций полезного компонента, ниже которого не целесообразно вести промышленную разработку. Величина бортового содержания – показатель вариативный, а его величина в случае повышения извлекаемости при совершенствовании технологического процесса может меняться в процессе эксплуатации в меньшую сторону. Снижение бортового содержания для руд черносланцевого типа всего на 0.2 г/т (с 0.7 до 0.5 г/т) может увеличить запасы объекта в разы!

В связи с этим была поставлена задача: получить из продуктов передела за счет модернизации принятой схемы обогащения более высокий выход металла и, следовательно, снизить бортовое содержание. Повышение выхода металла достигается за счет его доизмельчения из продуктов передела, которыми являются хвосты сорбции и флотации. Теоретически это возможно на основе доизмельчения и вовлечения в процесс наноразмерного золота и платиноидов.

Перспективным направлением измельчения является применение в схемах обогащения явления кавитации [1]. 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 неограниченна, в связи с чем вскрываются наноразмерные частицы. Применение кавитационных установок в технологических процессах извлечения благородных металлов все чаще используется на обогатительных предприятиях, но требует наработки необходимой научной базы для успешного внедрения.

Эффективность решения поставленной задачи определяется глубинными знаниями о веществе руды, что в свою очередь, вытекает из геологических усло-

вий формирования рудного объекта.

Методика

Содержание благородных металлов в жидкой фазе определялось на приборе атомно-абсорбционной спектроскопии Квант-Z ЭТА-Т с электротермической атомизацией (ААС ЭТА) в графитовом кювете (ООО «Кортэк», Россия), с коррекцией спектральных помех способом обратного эффекта Зеемана. Неселективное поглощение – основная спектральная помеха в атомно-абсорбционном анализе. В данном случае под неселективным поглощением понимается неатомное, фоновое поглощение, которое, в некоторых случаях, сильно зависит от длины волны, что затрудняет его коррекцию традиционными способами. Это поглощение имеет место в том случае, когда в атомизаторе в процессе испарения пробы, наряду с атомами определяемого элемента, в газовой фазе появляются молекулы, спектральная полоса поглощения которых накладывается на линию поглощения определяемого элемента.

Для определения благородных металлов использовались спектральные лампы с полым катодом с длиной волны для золота – 242.8 нм, платины – 265.9 нм. Защитный газ – аргон. Быстрый нагрев графитовой печи обеспечивает разделение во времени процессов атомизации и диссипации атомного пара из аналитического объема. В результате амплитуда сигнала зависит только от количества элемента в пробе, но не зависит от компонентов матрицы и параметров переноса. Для анализа отбиралась аликвота 5 мм³, которая разлагалась в печи анализатора. Программа нагрева печи: нарастание на всех режимах 3 с: «испарение» – 5 с при 110°C, «пиролиз 1» – 5 с при 130°C. Параметры «пиролиз 2», «атомизация» и «очистка» приведены в табл. 1.

Для определения содержания благородных металлов в твердой фазе производилось ее растворение в «царской водке», с последующим замером уровня концентрации металла в жидкой фазе на вышеуказанном приборе и пересчетом на исходное вещество. Навеска пробы с массой, измеренной до четвертой значащей цифры (примерно 2.000 – 5.000 г), помещалась в фарфоровую чашку диаметром 90 мм, смачивалась дистиллированной водой, добавлялось 40 см³ свежеприготовленной смеси соляной и азотной кислот (3:1), чашка покрывалась стеклом и ставилась на водяную баню. Через 40–50 минут снималось стекло, и содержимое чашки выпаривалось до влажных солей. Далее добавлялось еще 25 см³ свежеприготовленной смеси соляной и азотной кислот (3:1), снова нагревалось, и снова выпаривалось. Затем прибавлялось 35 см³ 1М горячего раствора HCl, содержимое чашки перемешивалось стеклянной палочкой, отделяя осадок от дна и стенок чашки, и фильтровалось через воронку Бюхнера или через воронку с двойным фильтром «белая лента» диаметром 11 см, собирая фильтрат в стакан или коническую колбу на 250 см³. Чашку и осадок на фильтре тщательно промывалось 1М горячим раствором HCl до полного исчезновения желтой окраски на фильтре. Промывные воды собирались в стакан с фильтратом,

Табл. 1. Параметры программы нагрева графитовой печи на стадиях «пиролиз 2», «атомизация» и «очистка»
[Table 1. Parameters of the graphite furnace heating program at the stages "pyrolysis 2", "atomisation", and "cleaning"]

Элемент [Element]	Пиролиз 2 [Pyrolysis 2]				Атомизация [Atomization]				Очистка [Cleaning]			
	Нарастание, с [Increase, s]	Выдержка, с [Soak, s]	Температура, °C [Temperature, °C]	Газ ¹ [Gas ²]	Нарастание, мс [Increase, ms]	Выдержка, мс [Soak, ms]	Температура, C [Temperature, C]	Газ ¹ [Gas ²]	Нарастание, с [Increase, s]	Выдержка, мс [Soak, ms]	Температура, C [Temperature, C]	Газ ¹ [Gas ²]
Золото [Gold]	3	5	800	O	0	900	2300	3	0	2000	2600	O
Платина [Platinum]	3	5	900	O	0	900	2600	3	0	2000	2650	O

Примечания: ¹ O – открыт; 3 – закрыт; ² [O - open; C - closed]

охлаждались и переносились в мерную колбу на 200 см³. Пробоподготовка проводилась согласно методике [2].

Обработка материала производилась на кавитационной установке роторного типа. Для этого пробу массой 3 кг естественной влажности смешивали с 9 литрами воды из системы центрального водоснабжения (рН ≈ 6–8, общая минерализация не более 1 г/л). Подготовленную пульпу из резервуара подавали в кавитационную установку при постоянном замере температуры, уровня рН, времени. Обработка прекращалась при достижении температуры раствора 80°С.

При исследовании гранулометрической характеристики были использованы государственные стандарты и техническая литература: ГОСТ 12536-2014 «Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава» и ГОСТ 5180-2015 Методы лабораторного определения физических характеристик [3].

При определении гранулометрического состава пробы применяли ареометрический метод, сущность которого заключается в измерении плотности суспензии ареометром в процессе ее отстаивания. Во избежание коагуляции в грунтовую суспензию в качестве стабилизатора добавляют 6.7 %-ный водный пирофосфорнокислый натрий.

Однако на практике, методика исследования несколько отличается от приведенных в ГОСТ 12536-2014 «Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава». Показания по ареометру снимали с интервалами 1 и 30 минут после взмучивания. На следующий день через 24 ч, взмучивали еще раз и снимали показания через 3 ч.

Схема эксперимента: 1) определение содержания золота в первичном продукте передела; 2) проведение кавитационной его обработки в различных средах (нейтральная, солянокислая); 3) проведение повторной кавитационной обработки (для оптимизации времени кавитации); 4) определение золота в пробах после КО.

Геология месторождения «Красное»

Территория месторождения «Красное» расположена на правом берегу реки Бодайбо, в ее верхнем течении. Район достаточно хорошо освоен в экономическом отношении и располагается в 40–50 км от разведанных рудных месторождений Сухой Лог, Вернинское (рис. 1). В окрестностях ведется добыча золота из россыпей различных типов.

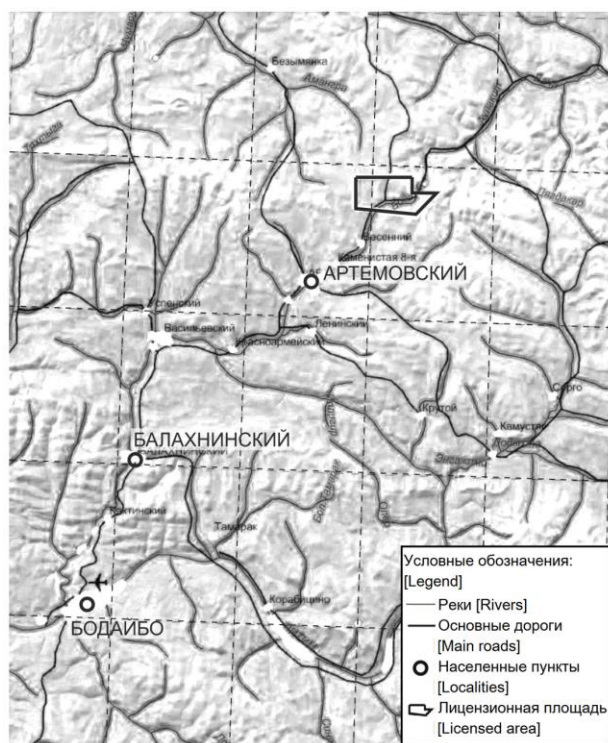


Рис. 1. Обзорная схема района расположения лицензионной площади месторождение «Красное».

[Fig. 1. An overview scheme of the location of the licensed area of the Krasnoe field.]

Центральная часть Ленской золотоносной провинции, в пределах которой находится участок «Красный», располагается в поясе байкалид в северном

крыле Бодайбинской сложной синклинали – одной из главных структур центральной части одноименного синклинория.

Синклиналь сложена осадочно-метаморфическими породами верхнего рифея относимых к *бодайбинской серии* верхнепротерозойского комплекса и перекрывается рыхлыми отложениями четвертичной системы (рис. 2). По литолого-фациальным особенностям серия разделяется на две части. Нижняя, пред-

ставленная аунакитской и вачской свитами, сложена углеродистыми мономиктовыми кварцевыми песчано-сланцевыми отложениями. Верхняя, включающая анангарскую, догалдынскую и илигирскую свиты, характеризуется развитием существенно песчаных и терригенно-карбонатных отложений [Корева А. И. Пояснительная записка «Стратиграфия» к авторской карте лицензионной площади Участок Красный, Бодайбо, 2016].

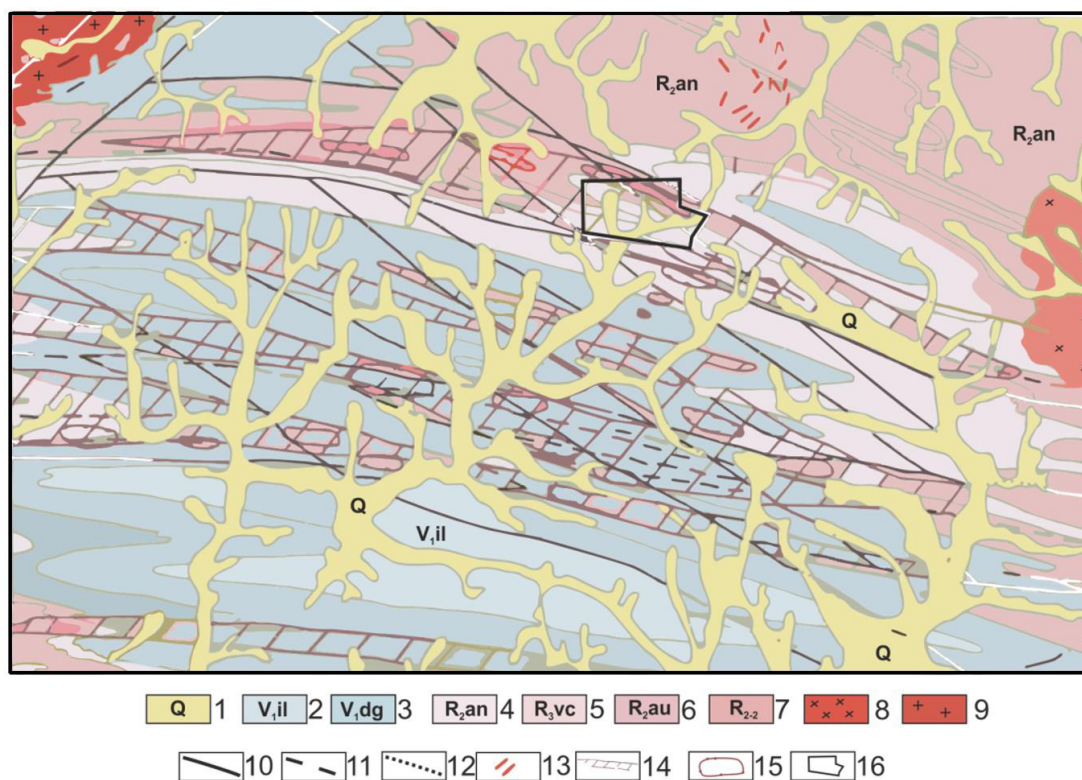


Рис. 2. Геологическая схема района работ. Условные обозначения: Осадочные образования. 1 – Четвертичные образования нерасчлененные; Нижний венд. 2 – Илигирская свита (алевролиты песчаники, известняки), 3 – Догалдынская свита (песчаники, кварц-слюдистые сланцы). Верхний рифей. 4 – Анангарская свита (граувакки, песчаники, филлитовидные сланцы), 5 – Вачская свита (углистые алевролиты, песчаники, филлиты), 6 – Аунакитская свита (кварцевые песчаники, филлиты), 7 – Имняхская свита (мраморизованные известняки, слюдисто-карбонатные сланцы). Магматические образования. 8 – Коикудеро-мамакоиский комплекс (γ Pz km) (диориты, гранодиориты), 9 – Мамско-оронский комплекс (γ R_{3m}) (граниты, гнейсо-граниты). Тектонические нарушения. 10 – прослеженные, 11 – предполагаемые, 12 – скрытые под четвертичными отложениями. 13 – кварцевые жилы. 14 – Зоны жильно-прожилковатого окварцевания. 15 – Геохимические аномалии золота. 16 – Границы участка работ.

[Fig. 2. Geological map of the area of work. Legend: sedimentary formations. (1) Quaternary formations, poorly defined. Lower Vendian. (2) Iligirskaya suite (siltstones, sandstones, limestones), (3) Dogaldynskaya suite, (sandstones, quartz-mica schists). Upper Riphean. (4) Anangara suite (greywackes, sandstones, phyllitic schists), (5) Vachskaya suite (carbonaceous siltstones, sandstones, phyllites), (6) Aunakit suite (quartz sandstones, phyllites), (7) Imnyakhskaya suite (marbled limestones, micaceous-carbonate schists). Mafmetic rocks. (8) Koikudero-Mamakoiskiy complex (γ Pz km) (diorites, granodiorites), (9) Mamsko-Oron complex (γ R_{3m}) (granites, gneissogranites). Tectonic disturbances. (10) tracked, (11) supposed, (12) hidden under Quaternary deposits. (13) Quartz veins. (14) Zones of veined and veinlet-disseminated silicification. (15) Geochemical anomalies of gold. (16) Borders of the site.]

В пределах лицензионного участка «Красный» на дневную поверхность выходят породы аунакитской, вачской и анангарской свит.

Аунакитская свита (R_{3au}) является наиболее древним подразделением на рассматриваемой площади. Отложения свиты развиты на северо-западе и слагают ядерные части Верхне-Бодайбинской и рудной антиклиналей, осложняющих более крупную Бодайбинскую синклинали. По своим литологическим

особенностям свита разделена на три подсвиты. *Нижняя подсвита* сложена преимущественно (на 90%) кварцевыми песчаниками с редкими прослоями углеродистых филлитов и известковистых песчаников. Мощность подсвиты 100–120 м. *Средняя подсвита* представлена темно-серыми, серыми углеродистыми филлитами с маломощными прослоями кварцевых песчаников и алевролитов. Мощность подсвиты 400 м.

Вачская свита расчленена на две подсвиты: верх-

ною и нижнюю. *Нижняя подсвита* сложена из двух горизонтов: первый характеризуется высокоуглеродистыми кремнистыми сланцами с прослоями темно-серых кварцитовидных песчаников, а второй сложен черными высокоуглеродистыми филлитами и серицит-кварцевыми сланцами с редкими прослоями кварц-серицитовых песчаников. В пределах *Верхней подсвиты* также выделяется два горизонта: первый представлен переслаиванием темно-серых кварцитов и высокоуглеродистых филлитов, второй сложен черными высокоуглеродистыми филлитами и серицит-кварцевыми сланцами.

Анангская свита (R3 an). Отложения свиты отмечаются на юге территории, где слагают, перекрывая южное крыло Рудной антиклинали и на северо-востоке согласно породы вачской свиты. По особенностям литологического состава пород выделяются две подсвиты: нижняя - черносланцевая и верхняя - светлая песчаниковая. *Нижняя подсвита* представлена двухкомпонентным ритмичным переслаиванием темно-серых углеродистых алевролитовых сланцев и серых мелкозернистых мета-песчаников. Мощность подсвиты 150 м. *Верхняя подсвита* объединяет в своем составе комплекс грубо переслаивающихся светлых разнородных метапесчаников, углеродистых сланцев и металевролитов. Встречаются редкие линзы полимиктовых метагравелитов. Мощность подсвиты 200–300 м.

Интрузивные магматические породы на участке работ не вскрыты, но широко распространены по периферии Бодайбинской зоны. Так гранитные массивы конкудеро-мамаканского комплекса ограничивают бассейн р. Бодайбо с юга (Энгажимино-Витимский массив), северо-востока (Джекдокарский), северо-запада (Чумаркойский). От площади работ граниты удалены на расстояние 40–50 км.

С гранитами и пегматоидными гранитами ассоциируют дайки пегматитов и кварцево-полевошпатовые жилы. Геологическое положение и вещественные особенности гранитоидов комплекса позволяют предположить их коровое происхождение.

Абсолютный возраст гранитов и пегматитов рассматриваемого комплекса из Мамского района, определенный аргоновым методом, находится в пределах от 292 до 343 млн. лет.

1. *Конкудеро-мамаканский комплекс*. Породы этого комплекса широко распространены на территории Бурятии (в бассейнах рек Витимкана, Верхней Ангары, Баргузина и др.). Ими сложены интрузивные тела крупного размера. В пределах же Иркутской области они развиты лишь в бассейне рек Мама и Мамакана, где образуют небольшой и средней величины (до 1400 км²) плутоны: Конкудерский, Угли, Дадыктинский, Екибзяхский, Мамаканский, Долгдаисинский и ряд более мелких тел в бассейне р. Среднего Мамакана. Все эти плутоны являются несогласными по отношению к складчатым структурам вмещающих пород. Для них характерны неправильная изометричная или слегка вытянутая форма и крутые контакты [Корева А.И. По-

яснительная записка «Стратиграфия. Участок «Красный» к авторской карте лицензионной площади Участок Красный, Бодайбо, 2016].

Геохимия. Для черносланцевых комплексов сухоложского типа характерны следующие геохимические особенности: среднее содержание мышьяка составляет 900 г/т, свинца – 150 г/т, цинка – 900 г/т, меди – 160 г/т.

Между золотом и мышьяком установлена слабая положительная корреляционная связь на уровне 0.156.

Для центральной части месторождения были проведены спектрозолотометрический и спектральный анализы по рудным частям разреза.

Рудные интервалы имеют слабые, но хорошо прослеживаемые положительные корреляционные связи элементов халькофильной группы (Ag, As, Pb, Zn, Cu). В рудных интервалах заметно возрастает (почти в 1-2 раза) уровень корреляции между Au и Ag, Au и элементов-халькофилов, а так же, Au с Mo, Ni, Vn. Самая заметная положительная связь отмечается между Ni и Cu (0.653). Все это свидетельствует о несомненном перераспределении элементов-примесей в процессе рудо-локализации Au на постседиментационном ее этапе.

Типы рудной минерализации

В рудном поле «Красное» выделяются два типа золоторудной минерализации: прожилково-вкрапленный кварц-сульфидный и кварцево-жильный. Первый пользуется широким распространением, второй развит ограничено.

Кварц-сульфидная минерализация образует прожилково-вкрапленные зоны среди метаморфогенных рассеянных зон сульфидной минерализации на участках структурных осложнений. Внутреннее строение зон представляет собой густую сеть разноориентированных прожилков, линз и гнезд, встречающихся совместно с интенсивной (более 1–3%) рассеянной вкрапленностью (пирита) в рассланцованных и кливажированных вмещающих породах.

Наиболее минерализованы осевая часть Рудной антиклинали (где расположено собственно рудопроявление «Красное»), и осевая часть Верхне-Бодайбинской антиклинали (Верхне-Бодайбинская минерализованная зона).

Кварцевая минерализация жил и прожилков, которые обычно имеют линзовидную морфологию: мощность от 0.2 см до 0.5 м и протяженность от первых сантиметров до десятков метров.

Кварцево-жильные поля и зоны приурочены к ядру и южному крылу Верхне-Бодайбинской антиклинали и южному крылу Рудной антиклинали, располагаются в пределах субширотных зон (полос) рассеянной кварцевой и кварц-сульфидной минерализации.

Руды представлены слабо выветрелыми и в разной степени ожелезненными кварцевыми песчаниками, алевролитами и глинистыми сланцами.

Основная масса первичных пород состоит из кварцевых песчаников, алевролитов и сланцев темно-серого до почти черного цвета из-за примеси углеродис-

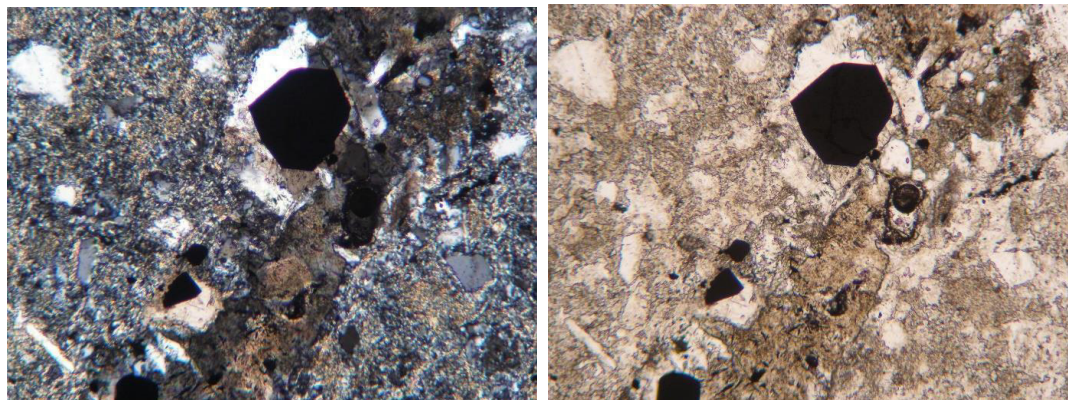


Рис. 3. Алевропелит с прожилком кварц-карбонатного состава. Поле зрения 5.0 мм. Слева николи +, справа ||.
[Fig. 3. Aleuropelite with a vein of quartz-carbonate composition. The range of vision is 5.0 mm. On the left is nicols +, on the right ||.]

того вещества. Рудная минерализация пирита в виде разномасштабной неравномерной вкрапленности, гнезд, прожилковидных скоплений. Жильный кварц наблюдается в виде секущих прожилков, просечек, гнезд в основной массе породы, либо образует оторочки вокруг крупных метакристаллов пирита.

В литологически разных породах рудная минерализация имеет свои нюансы. Так, в песчаниках она представлена в основном в виде неравномерной, разномасштабной (от долей мм до 1.5–3 см) вкрапленности пирита, в основной массе породы, а также в виде гнезд, линз и прожилков кварцевого и карбонат-кварцевого состава (рис. 3).

Для алевролитов рудная минерализация представлена в основном пиритом в виде отдельной вкрапленности кубовидных кристаллов, их скоплений в основной массе, либо приуроченных к кварцевым, и кварц карбонатным гнездам, линзам и прожилкам.

Для углеродистых глинистых сланцев характерна сланцеватая микротекстура с основной массой, представленной тонкошелушчатый агрегат гидрослюда и углеродистым веществом с распыленным пиритом с примесью кварца, карбонатов, редкой вкрапленностью турмалина и рутила.

Все изученные породы содержат углерод в органической форме 0.42–2.8 %. Наиболее высокие содержания органического углерода характерны для первичных руд месторождения 1.21–2.8 %.

Рудные пробы состоят, преимущественно, из порообразующих минералов из которых существенное значение имеют кварц и гидрослюда. Доля глинистой фракции в пробах руды не превышает 1.0 % и по данным рентгеноструктурного анализа представлена в основном иллитом с незначительной примесью парагонита.

Как уже отмечалось, из сульфидов преобладает пирит. Арсенопирит, пирротин, сульфиды меди, сфалерит, галенит, блеклая руда, антимонит, герсдорфит, кобальтин отмечаются только в редких и единичных зернах. Из гипергенных образований присутствуют в основном гидроксиды железа (*лимонит, гетит и гидрогетит*).

Углеродистое вещество представлено рентгеноаморфной фазой. Электронные снимки углеродистого вещества (увеличение от 8000 до 30000) показали их тонкую дисперсность, что предполагает высокую сорбци-

онную емкость. При больших увеличениях видно, что каждая частица обладает дополнительной пористостью, обусловленной структурным состоянием углерода. Очевидно, что органический углерод имеет важнейшую роль в накоплении первичного ресурсного потенциала золота и других драгметаллов (рис. 4).

Таким образом, на основании всего многообразия геологических факторов, влияющих на формирование руды, можно сделать следующие выводы. Отложения, образующие структуру месторождения Красное, формируются в условиях апвеллинговых фаций на пассивной континентальной окраине, в результате чего сформировался комплекс с повышенными содержаниями органического углерода, имеющего как терригенное, так и аквагенное происхождение. Рудных потенциал формировался в несколько этапов: 1) в процессе седиментогенеза; 2) на стадии диагенеза; 3) в процессе метagenеза.

На первой стадии углерод, обладая повышенной сорбционной способностью, извлекал растворенные в морской воде металлы, в первую очередь золото. На второй стадии, при диагенезе в условиях повышенного содержания углерода в восстановительной среде образовывался первичный седиментогенный пирит и другие сульфиды, которые характеризовались повышенными концентрациями драгметаллов, главным образом, в наноразмерном и тонкодисперсном состоянии. В результате метagenеза произошло существенное перераспределение драгметалльной группы. Эта стадия, вероятно, была сложной многоэтапной как минимум включающая фактор регионального и контактного метаморфизма под влиянием термального поля в более позднее время. Отсюда, многостадийный рудный процесс связанный с различными наложенными друг на друга факторами перераспределения рудного потенциала.

Общая характеристика исходной руды и схема ее обогащения

Исходная руда с карьера поступает в приемный бункер из которого направляется на измельчение. Усредненная руда после измельчения имеет химический состав, приведенный в табл. 2. Средний уровень содержания Au в ней составляет 2.5 г/т. Золото, в соот-

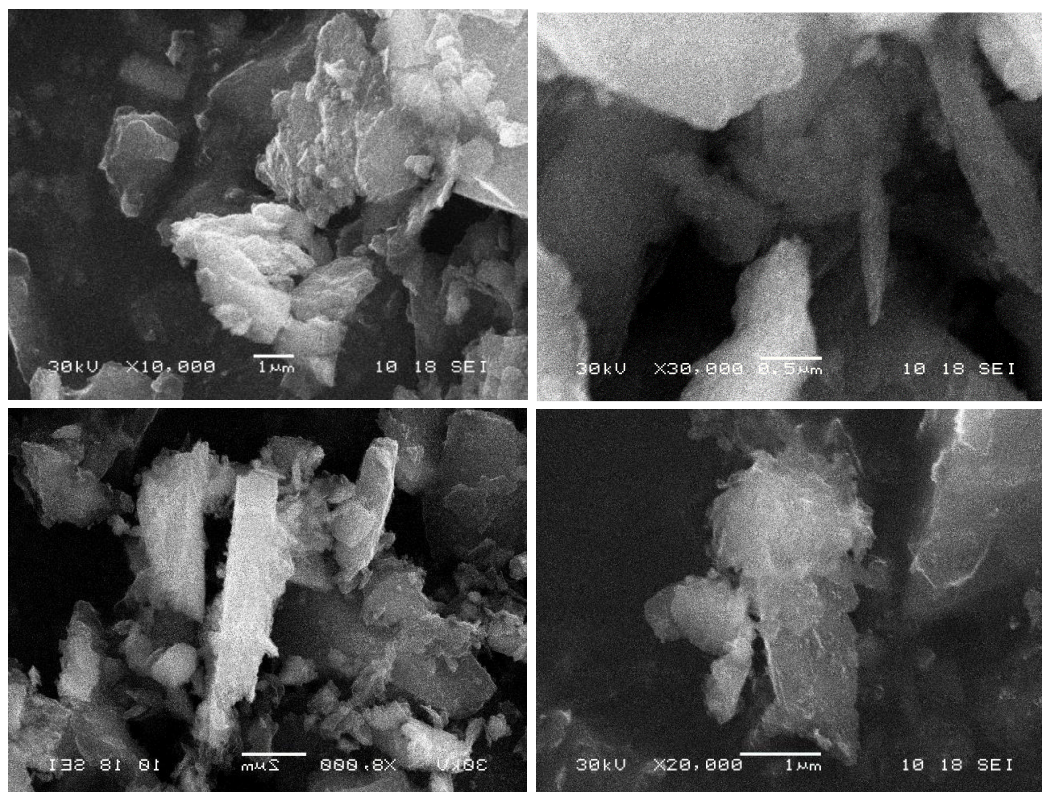


Рис. 4. Органический углерод под электронным микроскопом (увеличение от 8 до 30 тысяч)
[Fig. 4. Organic carbon under an electron microscope (magnification from 8 to 30 thousand).]

Таблица 2. Химический состав исходной руды и продуктов ее переработки
[Table 2. Chemical composition of the original ore and products of its conversion]

Наименование [Name]	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	ППП	Сумма [Amount]
Исходная проба [Initial sample]	0.65	1.78	17.61	56.11	0.23	1.05	1.11	0.32	0.88	11.75	8.39	99.87
Хвост флотации [Flotation tail]	0.61	1.73	16.60	56.15	0.24	1.35	1.15	0.26	0.76	13.17	7.88	99.90
Хвост сорбции [Sorption tail]	0.74	1.13	8.25	41.30	0.35	3.82	0.50	0.30	0.52	30.65	12.19	99.74

Продолжение **Табл. 2.** Содержание примесей, ppm.
[Table 2 continued. Content of impurities, ppm]

Наименование [Name]	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Rb
Исходная проба [Initial sample]	23	143	106	14	58	46	99	21	178	109
Хвост флотации [Flotation tail]	7	134	91	12	52	31	85	18	127	96
Хвост сорбции [Sorption tail]	16	68	63	57	150	812	129	11	340	74

Наименование [Name]	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Cs	Ba	Pb	Au ¹ . г/т [g/t]	Pt ² . г/т [g/t]
Исходная проба [Initial sample]	173	31	201	14	16	7	1184	23		
Хвост флотации [Flotation tail]	150	27	177	13	14	37	1127	17	0.16 (0.161)	4.77
Хвост сорбции [Sorption tail]	144	56	490	10	3	5	765	37	1.56 (1.564)	4.18

Примечания: 1 – Данные пробирного анализа; в скобках – ААС ЭТА [The data of an assay test; in brackets – ETA AAS];
 2 – Данный анализа ААС ЭТА [The data of the ETA AAS analysis]

ветствии с фазовым анализом, распределено следующим образом: свободный металл 10–15%, в сростках с породообразующими 15–20%; связанный с сульфидами 50–65% и связанный с углеродистым веществом 5–10%. Извлекаемость составляет 88–90%, что для руд с двойной упорностью является весьма высоким показателем.

Традиционная схема извлечения золота из руд такого типа включает в себя следующие процессы: 1) тонкое измельчение руды (менее 70 мкм), затем 2) гравитационное и 3) флотационное обогащения; 4) флотоконцентрат с добавлением промпродукта от гравитации попадают на сорбцию. Сорбция обычно происходит в цианистых растворах с осаждением металла на смолу или уголь. Ценный компонент с сорбента снимается в процессе десорбции, а сорбент возвращается в цикл. Насыщенные растворы с десорбции направляются на электролиз с последующей плавкой и получением сплава Доре.

Описание эксперимента, результаты и их обсуждение

В качестве объекта исследования были отобраны две пробы технологического передела обогатительного производства, а именно: хвост контрольной фло-

тации (ХФ) и хвост сорбции (ХС). Обе пробы представлены тонкоизмельчённым продуктом с содержанием золота по пробирному анализу: проба № 1 (ХФ) – 0.16 г/т, проба № 2 (ХС) – 1.56 г/т.

Из содержаний видно, что хвост контрольной флотации (проба № 1) не пригодна для дальнейшего обогащения по существующей технологии в связи с малым содержанием золота. Такой продукт идет в хвостохранилище. Хвост сорбции (проба № 2) необходимо до обогащать.

При проведении кратковременной (~ 3 мин) кавитационной обработки (КО) отмечается дополнительное измельчение рудной составляющей пульпы. Так при попытках фильтровать сразу после КО через фильтровальную бумагу марки «Синяя лента», твердые частицы проходят через поры фильтра. Размер пор по справочным данным [4] составляет 0.8–1.7 мкм. При отстаивании продукта кавитации на протяжении 2–3 суток оседание мелкой фракции не наблюдается.

В связи с этим возникает задача исследовать гранулометрическую характеристику продуктов кавитационной обработки.

Полученные ареометрическим методом данные гранулометрической характеристики приведены в табл. 3 и представлены графически на рис. 5.

Табл. 3. Распределение гранулометрического состава по фракциям в рудной массе
[Table 3. Distribution of granulometric composition by fractions in the ore mass]

Фракция, мм [Fraction, mm]	0.1–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	Менее 0.001 [Less 0.001]	Сумма [Amount]
После КО [After CT]	32.48	46.45	7.56	2.16	11.34	100.00
До КО [Before CT]	38.20	47.29	7.88	0.41	6.22	100.00

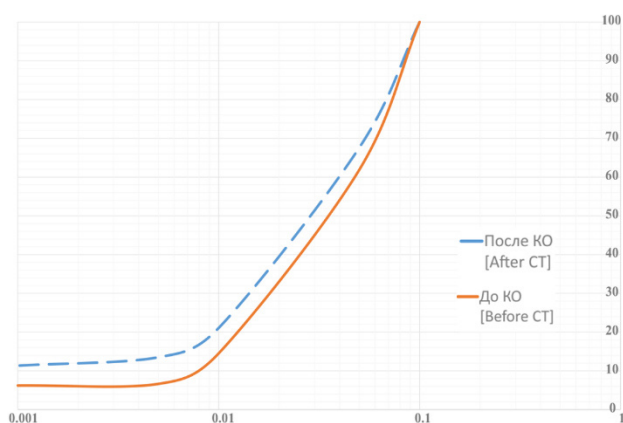


Рис. 5. Суммарная кривая гранулометрического состава в полулогарифмическом масштабе.

[Fig. 5. Summary curve of the granulometric composition on a logarithmic scale.]

Даже при кратковременной кавитации суммарное количество фракции менее 10 мкм возрастает на 65% с 14.5 до 21 %, на такое же количество уменьшается сумма фракции до 10 мкм.

По данным исследования гранулометрического со-

става проб до и после КО удалось рассчитать эффективный диаметр d_{10} (уменьшился с 0.008 мм до 0.001 мм), «Диаметр шестидесяти» d_{60} (уменьшился с 0.05 до 0.04 мм), коэффициент неоднородности (увеличился с 6.25 до 40 мм). По коэффициенту неоднородности проба после КО является более неоднородной по гранулометрическому составу.

Таким образом, кавитация способна измельчать рудный материал до наноразмерного состояния, что является одним из главных условий извлечения драгметаллов.

Определение содержания золота в продуктах передела было выполнено двумя методами – пробирным и атомно-абсорбционным. Данные по содержанию золота приведены в табл. 2, из которой следует высокая сходимость полученных результатов.

Кавитационная обработка проводилась несколькими заходами, что общим временем экспозиции 16–17 минут. Это обусловлено тем, что при кавитации происходит интенсивный нагрев пульпы.

После проведения КО минерального сырья, в нейтральной среде были получены следующие данные. КО пробы № 1 производилась в два этапа с экспози-

цией 5–6 мин на каждой из них. После первой КО содержание Au в твердой фазе (кек обработки) составляло 0.99 г/т, в жидкой – 0.01 г/т¹. После второй КО содержание в твердой фазе снизилось по сравнению с первой до 0.26 г/т, в жидкой – 0.03 г/т. Эта проба после КО в солянокислой среде показала содержание золота в твердой фазе 0.17 г/т, в жидкой – 0.55 г/т.

Таким образом, повышение содержания извлекаемого золота после КО по сравнению с исходной рудой увеличилось в 6 раз. В жидкой фазе содержание золота составляет, при перерасчете на твердую фазу, всего 0.03 г/т, т.е металл вне зависимости от времени кавитации в нейтральной среде практически не переходит в раствор. При дальнейшем воздействии кавитации содержание снизилось до 0.26 г/т в твердой фазе и до 0.03 г/т в жидкой, то есть последующая КО приводит к снижению определяемого золота. Это связано с активацией углистого вещества, которое сорбирует вскрытое золото. Этот эффект был описан ранее в [1,7].

При КО с соляной кислотой содержание золота в жидкой фазе (при перерасчете на твердую фазу) увеличивается до 0.55 г/т, при этом в твердой фазе содержание остается практически на первоначальном уровне (0.17 г/т). Наличие хлорид-иона и низкие значения pH переводят золото в растворимые хлоридные соединения. В нейтральной среде такой эффект не наблюдается.

Однако, можно заметить, что суммы содержаний

(ЖФ+ТФ) при КО в нейтральной среде (0.03+0.99=1.02 г/т) больше чем в кислой (0.55+0.17=0.72 г/т). При этом экспозиция примерно одинакова. Снижение суммарного определяемого золота можно объяснить активацией в кислых растворах при КО углерода, как основного сорбента.

После проведения КО хвостов сорбции (проба № 2) в солянокислой среде были получены следующие данные. После КО содержание золота в твердой фазе составило 6.60 г/т, в жидкой – 1.15 г/т (табл. 4). Суммарное содержание «скрытого» золота составляет 7.75 г/т, что в 5 раз превышает содержание золота в исходной пробе до кавитационной обработки. Переход основной части золота в твердую фазу можно объяснить активацией углистого вещества в процесс КО, которое сорбирует на себя выделенный в раствор металл. Суперизмельчение при КО активировало углистое вещество, сорбционные свойства которого повышаются.

Анализ на платину проводился только при КО в солянокислой среде на пробе № 2. Однако эти данные показывают, что поведение растворимости платины аналогично растворимости золота. До КО в пробе содержание платины 4.18 г/т, после – в жидкой фазе 2.00 г/т, в твердой – 15.70 г/т.

При планировании будущих исследований необходимо провести КО в растворах других растворителей золота (тиомочевина, цианистые растворы, гипохлорит-ион и др.).

Табл. 4. Результаты кавитационной обработки (ТФ – твердая фаза, ЖФ – жидкая фаза)
[Table 4. The results of cavitation treatment (SP – solid phase, LP – liquid phase)]

Описание [Name]	Время, мин/этап [Time, min / stage]	Среда [PH level]	C _{Pt} * руд. г/т [C _{Pt} ore. g/t]	C _{Au} руд. г/т [C _{Au} ore. g/t]
Проба № 1 ТФ [Sample № 1 SP]	8/1	≈ 7		0.99
Проба № 1 ЖФ [Sample № 1 LP]	8/1	≈ 7		0.01
Проба № 1 ТФ [Sample № 1 SP]	8/2	≈ 7		0.26
Проба № 1 ЖФ [Sample № 1 LP]	8/2	≈ 7		0.03
Проба № 1 ТФ [Sample № 1 SP]	16	<2		0.17
Проба № 1 ЖФ [Sample № 1 LP]	16	<2		0.55
Проба № 2 ТФ [Sample № 2 SP]	17	<2	15.70	6.60
Проба № 2 ЖФ [Sample № 2 LP]	17	<2	2.00	1.15

Примечание: * – в пересчете на руду [In terms of ore]

Заключение

Отложения, образующие структуру месторождения Красное, формировалось предположительно в условиях апвеллинговых фаций на пассивной континентальной окраине, в результате чего сформировался

комплекс с повышенными содержаниями органического углерода, имеющего как терригенное, так и аквагенное происхождение.

Рудных потенциал формировался в несколько этапов: 1) в процессе седиментогенеза; 2) на стадии диаге-

¹ здесь и далее в пересчете на руду

неза; 3) в процессе метагенеза.

На первой стадии углерод, обладая повышенной сорбционной способностью, извлекал растворенные в морской воде металлы, в первую очередь золото. На второй стадии, при диагенезе в условиях повышенного содержания углерода в восстановительной среде образовывался первичный седиментогенный пирит и другие сульфиды, которые характеризовались повышенными концентрациями драгметаллов, главным образом, в наноразмерном и тонкодисперсном состоянии. В результате метагенеза произошло существенное перераспределение драгметалльной группы. Эта стадия, вероятно, была сложной и многоэтапной, включающая фактор регионального и контактного метаморфизма под влиянием термального поля в более позднее время. Отсюда следует многостадийный рудный процесс, связанный с различными наложенными друг на друга факторами перераспределения рудного потенциала.

В результате сформировались руды с так называемой двойной упорностью. Первый род упорности связан с наноразмерным состоянием драгметаллов (главным образом в пирите), в следствии чего их значительная часть уходит в хвосты обогащения. Второй род упорности связан с углеродом.

С одной стороны, при измельчении руды значительная часть наноразмерного золота вскрывается, а с другой – активизируется углерод, который активно абсорбирует золото. В этой связи будущие технологии должны предусматривать суперизмельчение, вариантом которого является способ кавитации с одновременным подавлением активности углерода.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ненахов В. М., Никитин А. В., Ненахова Е. В., Караичев О. В. Новое в технологии извлечения благородных металлов из упорных высокоуглеродистых руд. *Актуальные вопросы геологии: материалы Международной научно-практической конференции.* Белгород, 2019. С. 149–154.
2. 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
3. Чаповский Е. Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. Изд. 4-е. М., «Недра», 1975. 304 с.
4. Берлин А.Я. Техника лабораторной работы в органической химии. М.: Госхимиздат. 1963. 372 с.
5. Русанов Р.В., Янникова Ю.Ю., Янникова Л.Ю. Платиноносность Au-Ag формации на примере месторождения Валунистое (Чукотский автономный округ) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2019. № 4. С. 71–78. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2019.4/2698>
6. Schmidbauer H. Gold: chemistry, biochemistry and technology. N.Y.: John Wiley, 1999. 908 p.
7. Modern supramolecular gold chemistry: gold-metal interactions and applications. Ed. A. Laguna. N.Y.: John Wiley, 2008. 525 p.
8. Ненахов В. М., Янникова Ю. Ю., Ненахова Е. В., Русанов Р. В. Литологические и минеральные особенности элювиально-делювиальных надрудных отложений и проблемы их гравитационного обогащения для извлечения золотосеребряного концентрата (на примере рудопоявления Милоградское, Южное Приморье) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2017. № 2. С. 122–132.
9. Ярмаркин Д. А., Прохасько Л. С., Мазаев А. Н., Переходова Е. А., Асенова Б. К., Залилов Р. В. Перспективные направления кавитационной дезинтеграции // *Молодой ученый.* 2014. № 9 (68). С. 241–244.
10. Popel S. I., Adushkin V. V. Nanoscale particles in technological processes of beneficiation // *J. Nanotechnol.* 2014. № 5. P. 458–465.
11. 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
12. Лолейт С. И., Меретуков М. А., Стрижко Л. С., Гурин К. К. Современные проблемы металлургии и материаловедения благородных металлов: учеб. пособие. М.: Изд. Дом МИСиС, 2012. 196 с.
13. Marsden J., House I. The chemistry of gold extraction. N.Y. Horwood, 1993. 296 p. DOI: <https://doi.org/10.1179/030801892791925466>
14. Казакевич Ю. П., Шер С., Гладкова Т. П. Ленский золотоносный район, т.1. М.: Недра, 1971. 164 с.
15. Добрецов Н. Л., Соболев В. С., Ушакова Е. И. Метаморфические фации и формации: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. унта, 1980. 91 с.

**Geology and technological features
of the Krasnoe gold ore field (Irkutsk Region)**

© 2021 Yu. Yu. Yannikova, A. I. Fursov[✉], L. Yu. Zykova

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

Abstract

Introduction: As fields with a relatively low grade of gold deposits have become involved in processing, there is a primary task of modernising the existing technologies of enrichment of ores of the Sukholozhsk type, which will allow reducing the cut-off grades, and hence capitalising the projected companies. This technology involves super grinding by means of cavitation.

Methodology: Super grinding in neutral and chloride solutions was carried out using a cavitation system of a rotary type with the constant measurement of temperature, time, and pH. Determination of the valuable components was carried out by a QUANT-Z-ETA-1 atomic absorption spectrometer (OOO Kortek, Russia). Silicate analysis was performed by a S8 Tiger X-ray diffractometer (Bruker AXS GmbH, Germany). Electron probe microanalysis with scanning electron microscopy was conducted by a JSM-6510LV electron microscope (JEOL Ltd., Japan) and an INCA Energy 250 microanalysis system (Oxford Instruments, UK). Sample preparation was common for mixed acid (aqua regia), granulometric composition was according to GOST 12536-2014, physical characteristics were according to GOST 5180-2015.

Results and discussion: Before and after the cavitation treatment in neutral and acidic environments, two samples, which represent the products of different alternatives of technological conversion (sorption and flotation tailings), were studied to determine the kinetics of the recovery of precious components. As a results of these experiments, graphs of the changes in the granulometric composition after the process of cavitation were created and the degree of influence of the cavitation processes on precious metals (gold and platinum) was determined.

Conclusions: Ores in the Krasnoe field were formed under the conditions of upwelling facies on the passive continental margin. As a result, a complex with high contents of organic carbon was formed. It is both of terrigenous and aquagenic origin. Due to the extraction of nanoscale gold in the process of super grinding in a chloride environment, cavitation allows improving its recoverability, as well as ensuring the transition of platinum in a solution. However, it causes a problem, that of increasing carbon activity.

Key words: precious metals, nanoscale gold, high-carbon formations, double refractoriness, super-grinding, cavitation, nature-like technologies, black shales

Funding: The study was carried out with the financial support of 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".



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

For citation: 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>

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

REFERENCES

1. Nenahov V. M., Nikitin A. V., Nenahova E. V., Karaichev O. V. Novoe v tekhnologii izvlecheniia blagorodnykh metallov iz upornykh vysokouglerodistykh rud. *Aktualnye voprosy geologii: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferencii - materials of the International Scientific and Practical Conference*. [New in technology for the extraction of precious metals from refractory high-carbon ores. Topical issues of geology]. Belgorod, 2019, pp.149–154. (in Russ.).
2. Metodika NSAM 131-S *Spektralnye metody. Zoloto. Metodika kolichestvennogo himicheskogo analiza opredelenie zolota v gornykh porodakh, rudakh i produktakh ikh pererabotki plamenym atomno-absorbtsionnym metodom posle ekstrakcii izoamilovym 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.).
3. Chapovskii E. G. *Laboratornye raboty po gruntovedeniiu i mehanike gruntov*. Izd. 4-e [Laboratory works on soil science and soil mechanics. Ed. 4th.]. Moscow, Nedra publ., 1975, 304 p. (in Russ.).
4. Berlin A. Ia. *Tekhnika laboratornoi raboty v organicheskoi himii* [Laboratory technique in organic chemistry]. Moscow, Goshimizdat publ., 1963. 372 p. (in Russ.).
5. Rusanov R.V., Yannikova Yu. Yu., Yannikova L. Yu. Platinum content of the Au-Ag formation on the example of the Valunistoe deposit (Chukotka Autonomous Okrug). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2019, no. 4, pp. 71–78. (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2019.4/2698>
6. Schmidbauer N. Gold: chemistry, biochemistry and technology. N.Y.: John Wiley, 1999. 908 p.
7. Modern supramolecular gold chemistry: gold-metal interactions and applications. Ed. A. Laguna. - N.Y.: John Wiley, 2008. 525 p.
8. Nenakhov V. M., Yannikova Yu. Yu., Nenakhova E. V., Rusanov R. V. Lithological and mineral features of eluvial-deluvial supra-ore deposits and the problems of their gravitational concentration for the extraction of gold-silver concentrate (for example, ore occurrence Milogradovskoe, South Primorye *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2017, no. 2, pp. 122–132. (in Russ.).
9. Yarkin D.A., Prokhasko L.S., Mazaev A.N. Perekhova E.A., Asenova B.K., Zalilov R.V. Perspektivnye napravleniia kavitacionnoi dezintegratsii [Prospective directions of cavitation disintegration]. *Young scientist*, 2014, no. 9 (68), pp. 241–244. (in Russ.).
10. Popel S. I., Adushkin V. V. Nanoscale particles in technological processes of beneficiation. *J. Nanotechnol*, 2014, no. 5, pp. 458–465.
11. 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.
12. Lawleyt S. I., Meretukov M. A., Strizhko L. S., Gurin K. K. *Sovremennye problemy metallurgii i materialovedeniia blagorodnykh metallov: ucheb, posobie* [Modern problems of metallurgy and materials science of noble metals: textbook, manual. Moscow, MISIS publ., 2012. 196 p.
13. Marsden J., House I. The chemistry of gold extraction. N.Y Horwood, 1993. 296 p. DOI: <https://doi.org/10.1179/030801892791925466>
14. Kazakevich Iu. P., Sher S., Gladkova T. P. *Lenskii zolotonosnyi raion. Cp. 1*. [Lensky gold-bearing region, vol. 1.]. Moscow, Nedra publ., 1971. 164 p.
15. Dobretcov N.L., Sobolev V.S., Ushakova E.I. *Metamorficheskie facii i formatsii: ucheb. posobie* [Metamorphic facies and formations: textbook. allowance]. Novosibirsk, NSU publ., 1980. 91 p.

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

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

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

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

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

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

All authors have read and approved the final manuscript.