

УДК 622.7

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ
ЗОЛОСОДЕРЖАЩЕГО СУЛЬФИДНОГО СЫРЬЯ
НА ОСНОВЕ МАГНИТНО-КОЛЛОИДНОЙ ОБРАБОТКИ**

**И. И. Бакшеева¹, Е. А. Бурдакова^{1,2}, В. И. Ростовцев³,
А. А. Плотникова¹, А. М. Жижаяев², Г. Н. Бондаренко²**

¹Сибирский федеральный университет,

E-mail: irina_igorevna@mail.ru, просп. Свободный, 79, 660041, г. Красноярск, Россия

²Институт химии и химической технологии СО РАН, Красноярский научный центр СО РАН,
Академгородок, 50/24, 660036, г. Красноярск, Россия

³Институт горного дела СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Приведены результаты экспериментальных исследований по магнитно-коллоидной модификации магнитных свойств золотосодержащей сульфидной руды. Установлено, что в магнитном продукте высокоградиентного сепаратора повышается содержание золота на 2.52 %, извлечение на 1.67 %.

Минеральное сырье, рудоподготовка, изменение магнитных свойств золотосодержащей сульфидной руды, ферромагнитная жидкость, функционализация, магнитно-коллоидная обработка, магнитная сепарация, наночастицы

DOI: 10.15372/FTPRPI20220116

Золото в современном мире продолжает занимать важное место в экономике. Долгое время золотосодержащие руды, добываемые из недр земли, относились к категории легкообогатимых. Содержание золота в 1 т таких руд варьировалось в пределах от 1 до нескольких десятков граммов. Однако в последние десятилетия отмечается уменьшение доли легкообогатимой руды, поэтому предприятиям приходится вовлекать в переработку руды с низким содержанием ценных компонентов, сложным вещественным составом и тонкой дисперсностью [1, 2]. В связи с этим разработка эффективных технологических решений по повышению извлечения золота из исходного труднообогатимого сырья и продуктов его переработки весьма актуальна.

Особый интерес вызывают месторождения, золото в которых находится в виде тонко- и ультрадисперсных включений в различных минералах-носителях, так как использование такого сырья позволит восполнить минерально-сырьевую базу благородных металлов [3, 4]. Переработка данного сырья затруднена или вовсе невозможна общепринятыми в промышленной практике методами. Известные схемы переработки технологически упорных золотосодержащих руд основаны на процессе с применением цианистого натрия после сложной предварительной подготовки материала путем механического (тонкий и сверхтонкий помол), биогидрометаллургического (бактериальное выщелачивание) и термохимического (обжиг) вскрытия золотосодержащих сульфидов.

В настоящее время проводятся научные исследования по использованию нетрадиционных способов интенсификации процессов обогащения труднообогатимого сырья за счет энергетических воздействий: радиационных, ультразвуковых, электрохимических, механохимических, плазменных и других [5, 6]. Установлено, что дозированные физические и физико-химические воздействия на поверхность минералов позволяют изменить их свойства в нужном направлении с целью последующего эффективного разделения [7–9]. В результате энергетических воздействий на минеральное сырье достигаются дезинтеграция и разупрочнение минеральных комплексов, вскрытие упорного золота и повышение его извлечения. Например, в [10] показано, что ультразвуковое воздействие способствует разрушению наименее прочных минеральных агрегатов и высвобождению из них мелкого золота, повреждению поверхностных пленок с раскрытием заключенного в них золота, перераспределению золота в более крупные классы за счет сохранения наиболее прочных сростков. Использование магнитно-импульсных воздействий позволяет увеличить выход готового (тонкого) класса и повысить извлечение ценного компонента на последующей гидрометаллургической операции, а также снизить энергоемкость измельчения [11].

Применение СВЧ-технологий также способствует повышению извлекаемости золота [12]. При такой обработке минералы пустой породы нагреваются, происходит растрескивание оболочки, что делает частицы золота доступными для извлечения [13]. Кроме того, внедрение СВЧ-воздействия для переработки упорных золотосодержащих руд и другого техногенного сырья позволяет улучшить экологическую обстановку в районах недропользования [13, 14].

К нетрадиционным способам концентрирования и извлечения золота из техногенных россыпей относится способ лазерной агломерации [15]. Известно использование источников лазерного излучения для обработки минеральных сред, содержащих золото и другие благородные металлы, с целью исследования твердофазных термохимических реакций и выявления фазовых переходов. Так, в результате лазерной обработки золотосодержащего минерального сырья получен концентрат, включающий ультрадисперсное золото, которое традиционными методами не извлекается [16]. В процессе агломерации тонкого золота в минералах под действием лазерного излучения образуются почти сферические субмиллиметровые гранулы золота. Как и СВЧ-технология, метод лазерной агломерации имеет практическую ценность благодаря экологической безопасности [17]. Однако, несмотря на свою технологическую эффективность, применение перечисленных нетрадиционных методов интенсификации процесса обогащения труднообогатимого золотосодержащего сырья в промышленных условиях ограничено из-за отсутствия достаточной инженерной проработки конструкций, адаптированных к промышленным условиям [18].

Еще более перспективным и бурно развиваемым в последнее десятилетие является направление нанотехнологии, связанное с тонким управлением коллоидными частицами специально разработанными способами модификации. Под модификацией наночастиц подразумевается присоединение к их поверхности тех или иных молекул, отвечающих за выполнение какой-либо функции разделяемых частиц. Магнитные частицы, состоящие из магнетита (Fe_3O_4) или маггемита ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) размером от субнано- до микрометров, реагируют на внешнее магнитное поле и благодаря своим уникальным магнитным свойствам обладают большим потенциалом для различных биомедицинских исследований, где используются в чистом виде или с различной модификацией поверхности [19–21]. В обогащении полезных ископаемых магнитные наночастицы нашли свое применение в процессах гравитации (в феррогидростатических сепараторах), сгущении (флокуляция полимерами), флотации, также их привлекают в качестве коллоидных и полимерных регуляторов [22].

Известно использование химически функционализированных суперпарамагнитных наночастиц в гидрометаллургии. В этом процессе ионы металлов (например, Cu^{2+}) сорбируются функционализированными наночастицами и извлекаются из пульпы вместе с ними методом магнитной сепарации. Предварительная концентрация металла таким способом существенно повышает показатели последующего электролиза в сравнении с известным способом жидкостной экстракции. После электролиза магнитные наночастицы регенерируются и возвращаются в процесс [23]. Использование магнитных коллоидов позволяет в ряде случаев достичь экстремально высокой селективности разделения частиц. Примером такой технологии является магнитная сепарация клеток [23]. Селективное закрепление магнитного коллоида обеспечивается функционализацией его поверхности активными группами, комплементарными к нужным клеткам. Высокая селективность и простота метода обеспечили его широкое распространение как в исследовательских методиках, так и в клинической практике.

Магнитные наночастицы нашли применение при очистке грунтовых и сточных вод от мышьяка [24]. Технология заключается в использовании наночастиц оксида железа крупностью 10–20 нм. Закрепление мышьяка на поверхности происходит за счет взаимодействия его с магнетитом без применения дополнительной функционализации поверхности какими-либо реагентами. Эффективность удаления мышьяка определяется составом магнитного коллоида. При введении в состав коллоидного магнетита кобальта или никеля скорость удаления мышьяка увеличивается. Регенерация магнитного коллоида осуществляется обработкой в щелочном растворе, далее магнитный коллоид используется повторно. Адсорбционные свойства коллоида после регенерации не ухудшаются.

В [25] магнитные наночастицы оксидов железа, функционализированные сульфгидрильными активными группами дигидротиюктовой кислоты, использовались для извлечения коллоидного золота из растворов. Предложенный способ заключается в том, что магнитную наночастицу покрывают слоем реагента (дигидротиюктовой кислотой), который закрепляется на поверхности частицы с помощью активной карбоксильной группы, другой конец функционализирующей молекулы имеет сульфгидрильную группу, способную связывать золото. В результате перемешивания коллоиды налипают на поверхность минерала, затем выделяются при помощи магнитных методов обогащения. Комбинирование таких способов с традиционными способами обогащения полезных ископаемых открывает новые возможности развития способов подготовки минералов к сепарации.

В данной работе для повышения эффективности обогащения золотосодержащего минерального сырья предлагается использовать процесс магнитной сепарации с предварительной модификацией магнитных свойств минералов-носителей золота: железосодержащих сульфидов магнитно-коллоидным способом [26]. Метод изменения магнитных свойств минеральных частиц коллоидами базируется на методах самосборки и функционализации частиц, которые широко применяются для управления магнитными наночастицами в медицине, в технологии очистки вод и других областях.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований служила золотосодержащая руда месторождения Бестобе, Казахстан (табл. 1). Месторождение тесно ассоциирует с малыми интрузиями порфировой формации диорит-гранодиоритового ряда. По морфологии выделяются жильные зоны, жильные поля и штокверки. Рудное сырье отличается широким спектром минералов и является основным объектом добычи. Анализ предыдущих исследований показал, что руда месторождения представлена множеством минералов — носителей золота, в частности тесной ассоциацией золота

с арсенопиритом в виде ультратонких включений в кристаллическую решетку минерала, из-за которых возникает сложность в разработке флотационных схем обогащения сырья. В настоящей работе изучалась возможность модифицирования минералов — носителей золота и управления их магнитными свойствами посредством обработки функционализированными магнитными коллоидами для повышения селективности обогащения сырья с использованием магнитных методов.

ТАБЛИЦА 1. Гранулометрический состав исходной руды месторождения Бестобе, %

Класс, мм	Выход	Содержание				Извлечение			
		Fe	S	As	SiO ₂	Fe	S	As	SiO ₂
+1	24.6	3.55	0.58	0.321	55.43	23.2	17.3	18.8	24.1
-1+0.5	28.6	3.56	0.66	0.279	58.88	27.0	22.9	19.0	29.8
-0.5+0.25	14.8	3.99	1.05	0.576	57.99	15.7	18.8	20.3	15.2
-0.25+0.125	10.2	4.15	1.24	0.717	57.79	11.2	15.3	17.4	9.9
-0.125+0.071	5.4	4.17	1.31	0.636	57.19	6.0	8.6	8.2	5.5
-0.071	16.4	3.87	0.86	0.416	53.57	16.9	17.1	16.3	15.5
Итого	100.0	3.77	0.82	0.420	56.52	100.0	100.0	100.0	100.0

Результаты химического анализа исследуемой пробы (табл. 2) показали, что основные петрогенные компоненты в ней — SiO₂, Al₂O₃, Fe, с содержанием 56.12, 6.35 и 4.68 % соответственно. В пробе обнаружены мышьяк 0.58 %, медь и цинк <0.01 %, а также золото 4.2 г/т и другие компоненты.

ТАБЛИЦА 2. Химический состав пробы руды месторождения Бестобе

Содержание компонентов	г/т, %	Содержание компонентов	г/т, %
Au	4.200	Al ₂ O ₃	6.35
Ag	4.000	BaSO ₄	<0.20
Cu	0.008	Ca	2.50
Pb	<0.010	Mg	1.51
Zn	<0.010	Se	<0.00100
Fe	4.680	Tl	<0.00020
S	2.080	Te	<0.00800
S(SO ₄)	<0.100	Mo	0.00045
As	0.580	Co	0.00190
Cd	<0.002	Ni	0.00190
C	1.460	Bi	<0.00063
C _{карб}	1.230	Sb	0.00360
SiO ₂	56.120		

Из данных фазового анализа следует, что в пробе исследуемой руды (табл. 3) сульфидного железа содержится 53.85 %, а доля его кислородсодержащих соединений составляет 46.15 %.

ТАБЛИЦА 3. Результат фазового анализа соединений железа в руде

Соединения железа	Содержание, %	
	абсолютное	относительное
Сульфидные	2.52	53.85
Кислородсодержащие	2.16	46.15
Итого	4.68	100.0

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования по обогащению материала проводились магнитными методами с предварительной магнитно-коллоидной обработкой материала перед разделением и без нее в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1

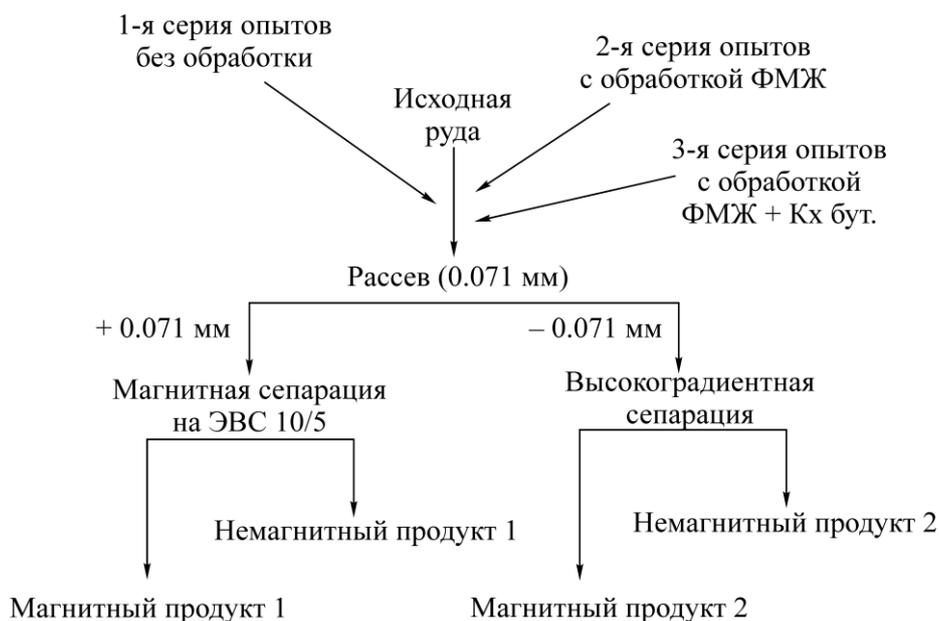


Рис. 1. Технологическая схема исследований

Магнитно-коллоидная обработка пробы исходной руды осуществлялась путем введения в пульпу ферромагнитной жидкости (15 % раствор магнетита в керосине ГОСТ 10227-86, стабилизированный олеиновой кислотой ГОСТ 7580-91) и коллоидов магнетита в форме эмульсии, состав которой включает в себя ферромагнитную жидкость (ФМЖ) и ксантогенат бутиловый (Кх бут.) ГОСТ 7927-75. Подробно метод селективного изменения магнитных свойств минеральных частиц, а также его характеристика изложены в [25].

Магнитная сепарация осуществлялась на сухом электромагнитном роликовом сепараторе типа ЭВС 10/5. Напряженность магнитного поля в рабочем зазоре сепаратора пропорциональна значению тока в обмотках магнитной системы. Исследования проводились при напряженности магнитного поля 1.7 Тл. В результате обогащения получены два продукта — магнитный продукт 1 (м. п. 1) и немагнитный продукт 1 (н. п. 1).

Исследования на мокром лабораторном полиградиентном сепараторе реализовывались при напряженности магнитного поля 1.28 Тл. В качестве ферромагнитной матрицы полиградиентного сепаратора использовалась железная дробь диаметром 3–6 мм. В результате обогащения получены два продукта: магнитный продукт 2 (м. п. 2) и немагнитный продукт 2 (н. п. 2).

Съемка поверхности образцов, выделенных из концентрата 3-й серии опытов (с обработкой ФМЖ + Кх бут.), осуществлялась на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM-3000 (Япония) с системой микроанализа Quantax 70 (Bruker, Германия). Для исследования образцы помещались на специальную смотровую площадку, имеющую вид металлической таблетки. Идентификация минеральных фаз проводилась рентгенофазовым анализом (РФА), используя американскую картотеку X-ray Powder Data File.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные результаты экспериментов по обогащению материала приведены в табл. 4, крупность дробной руды и ее рассев — в табл. 1.

ТАБЛИЦА 4. Данные исследований по совершенствованию технологии переработки золотосодержащего сульфидного сырья на основе его магнитно-коллоидной обработки

Продукт	Выход, %	Содержание				Извлечение, %			
		Fe, %	S, %	As, %	Au, г/т	Fe	S	As	Au
Без обработки									
м. п. 1	5.37	12.00	0.42	0.38	1.18	8.56	3.67	1.67	1.47
н. п. 1	68.23	7.30	0.66	1.24	4.51	66.17	73.36	69.27	71.40
м. п. 2	5.20	11.30	0.55	1.16	4.10	7.81	4.66	4.94	4.95
н. п. 2	21.20	6.20	0.53	1.39	4.51	17.46	18.31	24.12	22.18
Итого	100.00	7.53	0.61	1.22	4.31	100	100	100	100
Обработка ФМЖ									
м. п. 1	5.52	17.60	0.65	0.27	0.95	14.05	7.77	1.17	1.24
н. п. 1	68.12	6.20	0.42	1.34	4.48	61.09	61.89	71.86	72.13
м. п. 2	5.46	15.40	0.65	1.21	3.98	12.16	7.68	5.20	5.14
н. п. 2	20.90	4.20	0.50	1.32	4.34	12.70	22.66	21.77	21.49
Итого	100.00	6.91	0.46	1.27	4.23	100	100	100	100
Обработка ФМЖ + КХ бут.									
м. п. 1	2.39	16.90	0.48	0.55	1.93	5.28	1.82	1.10	1.13
н. п. 1	71.21	7.70	0.63	1.25	4.32	71.73	71.28	74.50	75.17
м. п. 2	4.28	14.70	0.44	1.90	6.33	8.23	2.99	6.81	6.62
н. п. 2	22.12	5.10	0.68	0.95	3.16	14.76	23.91	17.59	17.08
Итого	100.00	7.64	0.63	1.19	4.09	100	100	100	100

Перед обогащением исходная проба подвергалась мокрому ситовому анализу по крупности с получением надрешетного и подрешетного продуктов отсева. Материал крупнее 0.071 мм поступал на сушку с последующим разделением на сухом электромагнитном сепараторе с получением магнитной и немагнитной фракции. Материал мельче 0.071 мм отправлялся на обогащение в лабораторном высокоградиентном сепараторе без предварительной сушки. Высокоградиентная сепарация проводилась в щелочной среде (рН 8 – 9), создаваемой содой. В качестве осаждающих ферромагнитных тел использовалась буровая дробь диаметром 3 – 6 мм. В каждой из трех серий выполненных экспериментов получены по два магнитных и немагнитных продукта обогащения. Условия экспериментов варьировались в соответствии с технологической схемой, приведенной на рис. 1. Первоначально осуществлялись исследования на исходной руде без обработки, затем на руде с магнитно-коллоидной обработкой. Последняя серия опытов выполнена с применением реагентной (ксантогенат бутиловый) и магнитно-коллоидной

обработки. На рис. 2–4 приведены данные исследований по совершенствованию технологии переработки золотосодержащего сульфидного сырья на основе его магнитно-коллоидной обработки. На рис. 2 показаны рентнограммы магнитных продуктов, полученных на магнитных сепараторах: роликовом типа ЭВС 10/5 (м. п. 1) и полиградиентном типа ВГС (м. п. 2).

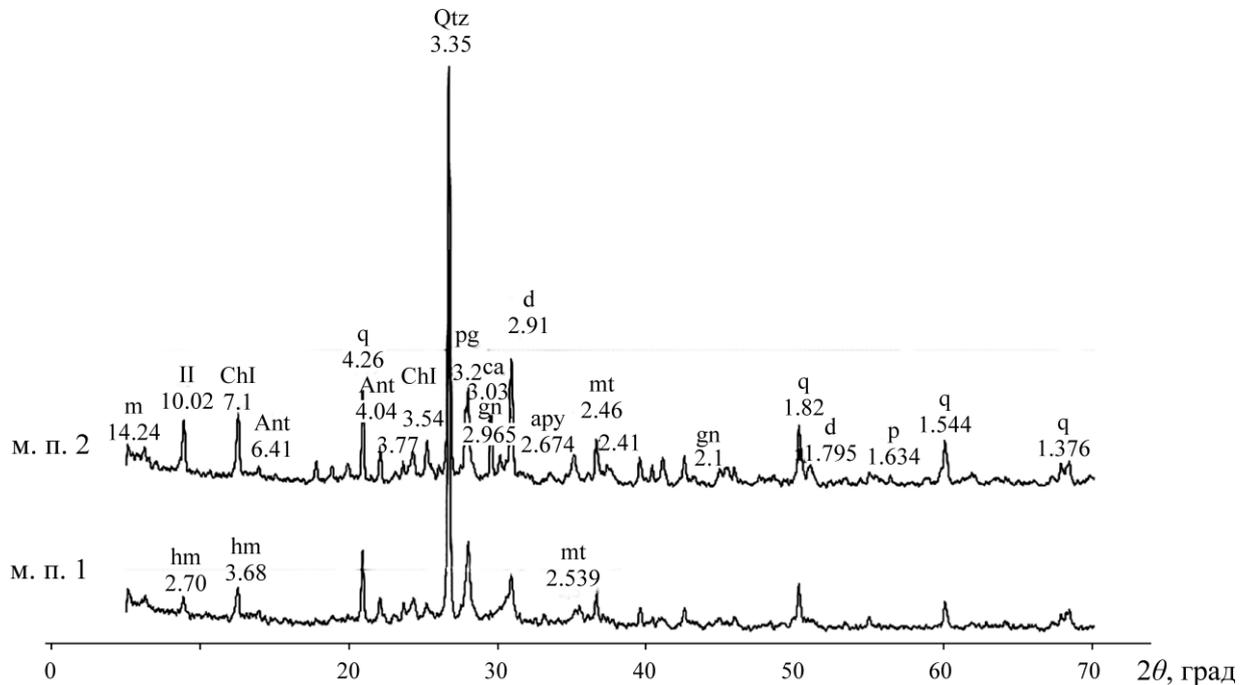


Рис. 2. Результаты РФА магнитных продуктов, полученных на сепараторах ЭВС (м. п. 1) и ВГС (м. п. 2) в первой серии экспериментов

По данным результатов рентнофазового анализа (рис. 2) магнитных продуктов первой серии экспериментов следует, что магнитные продукты м. п. 1 и м. п. 2 представлены зернами кварца (Qtz, q), магнетита (mt), анартита (Ant), плагиоклаза (pg), арсенопирита (apy), доломита (d) и пирита (p), также отмечаются примеси хлорита с глиной (Chl) и мусковит (m), слюда (II). Отличием магнитных продуктов второй серии опытов является присутствие в пробе магнитного продукта 1 зерен гематита (hm). Магнитные продукты 1 и 2 третьего эксперимента представлены, как и в первом эксперименте, зернами кварца (Qtz), магнетита (mt), плагиоклаза (pg), арсенопирита (apy), доломита (d), пирита (p), также отмечаются примеси хлорита с глиной (Chl) и мусковит (m).

Установлено, что магнитные продукты, полученные из руды месторождения Бестобе на сепараторах ЭВС 10/5 и ВГС, представлены преимущественно сростками сульфидов и кварца, раскрытыми зернами арсенопирита и пирита, а также сростками оксидов железа (в основном гематита) с кварцем. Обнаруженные на зернах сульфидов покровы магнитного коллоида доказывают, что повышение их магнитной восприимчивости связано с предварительной магнитно-коллоидной обработкой материала (рис. 3 и 4).

Сравнение технологических показателей обогащения проведенных экспериментов (табл. 4) показывает, что после предварительной магнитно-коллоидной обработки исходного материала эмульсией, содержащей в составе ФМЖ и бутиловый ксантогенат (Кх бут.), улучшается процесс селекции минералов. Выход магнитных фракций уменьшается, содержание Au в них увеличивается по сравнению с флотацией.

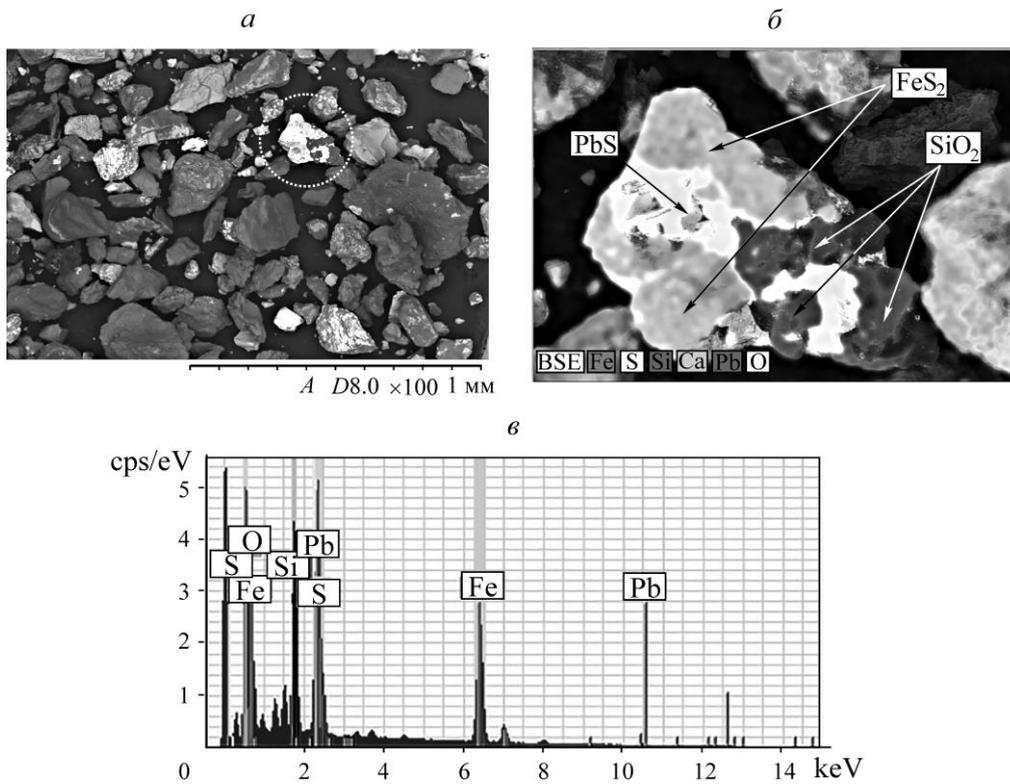


Рис. 3. Микрофотографии магнитного продукта, полученного на сепараторе ЭВС 10/5 (а), и выделенного участка — сростка галенита (PbS) с пиритом (FeS₂) с включением кварца (SiO₂) (б); рентгенограмма выделенного участка (в)

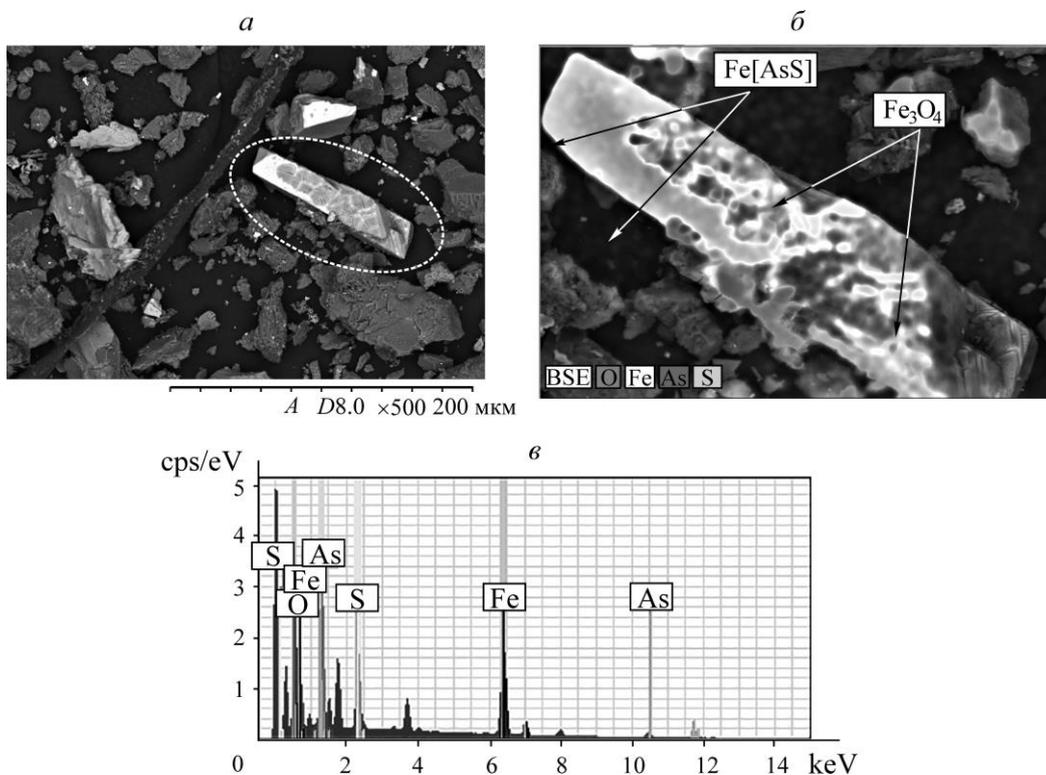


Рис. 4. Микрофотографии магнитного продукта, полученного на сепараторе ВГС (а), и выделенного участка — зерна арсенопирита (б); рентгенограмма выделенного участка (в)

ВЫВОДЫ

Экспериментально показано, что предварительная модификация магнитных свойств золотосодержащего минерального сырья магнитно-коллоидной обработкой позволяет с последующей магнитной сепарацией повысить извлечение золота в магнитную фракцию. Содержание золота в магнитном продукте возросло на 2.13 %, извлечение его в хвосты снизилось с 22.18 до 17.08 %. Применение выявленного эффекта позволит повысить эффективность переработки золотосодержащих сульфидных руд, в 1.5–2 раза сократить энергозатраты на последующие процессы извлечения золота и улучшить за счет применения магнитной сепарации экологическую обстановку на предприятиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Умарова И. К., Маткаримов С. Т., Махмарежабов Д. Б.** Исследование вещественного состава и гравитационное обогащение золотосодержащих руд месторождения Амантайтау // *Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. статей XXXII Междунар. научно-практ. конф.* — 2019. — С. 65–69.
- 2. Комогорцев Б. В., Вареничев А. А.** Проблемы переработки бедных и упорных золотосодержащих руд // *ГИАБ.* — 2016. — № 2. — С. 204–218.
- 3. Медяник Н. Л., Леонтьева Е. В.** Термохимическая переработка лежалых хвостов флотации // *Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения — 2017): материалы Междунар. науч. конф.* — 2017. — С. 362–364.
- 4. Самсонов Н. Ю.** Экономическая оценка эффективности переработки отвальных комплексов золоторудных месторождений // *Экономика региона.* — 2010. — № 2. — С. 139–146.
- 5. Хуайфа В., Бочкарев Г. Р., Ростовцев В. И., Вейгельт Ю. П., Шоуци Лу** Интенсификация обогащения полиметаллических сульфидных руд высокоэнергетическими электронами // *ФТПРПИ* — 2002. — № 5. — С. 96–103.
- 6. Ростовцев В. И.** О технологической и экономической эффективности использования немеханических энергетических воздействий при переработке труднообогатимого минерального сырья // *ФТПРПИ.* — 2013. — № 4. — С. 145–155.
- 7. Чантурия В. А., Филиппова И. В., Филиппов Л. О., Рязанцева М. В.** Влияние мощных наносекундных электромагнитных импульсов (МЭМИ) на состояние поверхности пирита и арсенопирита // *ГИАБ.* — 2009. — № S15. — С. 26–34.
- 8. Бунин И. Ж.** Мощные наносекундные электромагнитные импульсы и их применение в процессах дезинтеграции минеральных комплексов // *ГИАБ.* — 2008. — № 2. — С. 376–391.
- 9. Чантурия В. А., Бунин И. Ж., Иванова Т. А., Недосекина Т. В.** Исследование влияния высокоимпульсных (pulsed power) воздействий на физико-химические свойства поверхности сульфидных минералов и продуктов обогащения // *ГИАБ.* — 2005. — № 8. — С. 313–319.
- 10. Гурин К. К., Башлыкова Т. В., Ананьев П. П., Бобоев И. Р., Горбунов Е. П.** Извлечение золота из хвостов золотоизвлекательной фабрики от переработки упорных руд смешанного типа // *Цв. металлы.* — 2013. — № 5. — С. 39–43.
- 11. Кошель Е. А., Крылова Г. С., Седельникова Г. В., Ананьев П. П., Соловьев В. И.** Повышение эффективности измельчения золотосодержащего сырья на основе методов энергетического воздействия // *ГИАБ.* — 2004. — № 11. — С. 229–231.
- 12. Колесник В. Г., Урсова Е. В., Павлий К. В., Козлов В. В., Панкратьев П. В., Смирнова С. К.** Влияние СВЧ-обработки на извлечение золота из минерального сырья // *Цв. металлы.* — 2000. — № 8. — С. 72–75.

13. Ратникова Н. С., Панкратьев П. В. Повышение эффективности извлечения золота и серебра из пиритовых концентратов методом СВЧ-технологий // Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова. — 2019. — Т. 17. — № 4. — С. 4–9.
14. Zhu F., Zhang L., Li H., Yin Sh., Koppala S., Yang K., and Li Sh. Gold extraction from cyanidation tailing using microwave chlorination roasting method, *Metals — Open Access Metall. J.*, 2018, Vol. 8, Issue 12.
15. Мирзеханов Г. С. Условия формирования, принципы прогноза и оценки ресурсов техногенных образований отработанных россыпей золота (на примере юга Дальнего Востока): автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. — Благовещенск, 2005. — 46 с.
16. Пат. 2003135458 РФ. Способ лазерного формообразования и обогащения благородными металлами минеральных ассоциаций / Е. Б. Шевкун, А. П. Кузьменко, Н. А. Леоненко, Н. Г. Ятлукова, Н. А. Кузьменко // Опубл. в БИ. — 2005. — № 13.
17. Kuz'menko A. P., Rasskazov I. Yu., Leonenko N. A., Kapustina G. G., Silyutin I. V., Li J., Kuz'menko N. A., and Khrapov I. V. Thermocapillary extraction and laser-induced agglomeration of fine gold out of mineral and waste complexes, *J. Min. Sci.*, 2011, Vol. 47, No. 6. — P. 131–143.
18. Чантурия В. А. Инновационные технологии комплексной и глубокой переработки минерального сырья сложного вещественного состава // Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения — 2020): материалы Междунар. науч. конф. — 2020. — С. 3–4.
19. Elrahman A. A. and Mansour F. R. Targeted magnetic iron oxide nanoparticles: Preparation, functionalization and biomedical application, *J. Drug Delivery Sci. Tech.*, 2019, Vol. 52. — P. 702–712.
20. Yang P., Xu H., Zhang Z., Yang L., Kuang H., and Aguilar Z. P. Surface modification affect the biodistribution and toxicity characteristics of iron oxide magnetic nanoparticles in rats, *IET Nanobiotechnol.* — 2018. — Vol. 12. — P. 562–568.
21. Irvani S. Bio-based synthesis of magnetic nanoparticles and their applications, *Magnetic Nanostructures: Environmental and Agricultural Applications*, 2019. — P. 13–31.
22. Баранов Д. А., Губин С. П. Магнитные наночастицы: достижения и проблемы химического синтеза // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. — 2009. — Т. 1. — № 1–2. — С. 129–147.
23. Condomitti U., Zuin A., Silveira A. T., Araki K., and Toma H. E. Magnetic nanohydrometallurgy: A promising nanotechnological approach for metal production and recovery using functionalized superparamagnetic nanoparticles, *J. Hydrometall.*, 2010, Vol. 125. — P. 148–151.
24. Zborowski M. and Chalmers J. J. *Magnetic cell separation*, Elsevier, 2008. — 454 p.
25. Romanenko A. V., Bragin V. I., Baksheyeva I. I., Rostovtsev V. I., and Zhizhayev A. M. Extraction colloidal gold from solutions, *J. Siberian Federal University, Chemistry*, 2016, Vol. 9, No. 4. — P. 504–514.
26. Брагин В. И., Бакшеева И. И. Метод селективного изменения магнитных свойств минеральных частиц коллоидами // Обогащение руд. — 2012. — № 5. — С. 23–29.

Поступила в редакцию 22/XII 2021

После доработки 23/XII 2021

Принята к публикации 24/XII 2021