

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-1-II-34-40>

ЗОЛОТО В ПИРИТАХ И СУЛЬФИДАХ ПО ДАННЫМ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

© Герман Алексеевич Шевелев^{1*}, Эмма Николаевна Каменская¹,
Тлеужан Сабиржанович Турмагамбетов¹,
Николай Геннадьевич Каменский²

¹ ТОО «Центр Консалтинг», Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Тлендиева, д. 258В; *e-mail: german@c-consult.kz

² ТОО «Два Кей», Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Тлендиева, д. 258В; e-mail: info@2k.kz

*Статья поступила 22 сентября 2021 г. Поступила после доработки 22 сентября 2021 г.
Принята к публикации 24 ноября 2021 г.*

Метод сцинтилляционной атомно-эмиссионной спектроскопии (САЭС) позволяет при прямом анализе порошковых проб определять помимо общего содержания элемента форму его нахождения в образце и размер включений. С использованием комплекса «Гранд-Поток» проанализировали пробы кристаллов пирита разного размера для определения золота и формы его нахождения. Для всех исследованных пиритов не было отмечено зависимости содержания золота от размеров кристалла: в объеме кристаллов присутствуют частицы размером менее единиц мкм, крупных частиц Au нет. Установлено, что золото и другие драгоценные металлы сосредоточены в поверхностных слоях кристаллов пирита и в дефектах кристаллической решетки в объеме кристалла (по данным САЭС при лазерной абляции пробы в дуговой разряд). В объеме кристаллов пирита общее содержание золота составляет около 2 г/т, платины и серебра — менее 0,02 г/т, тогда как на поверхности содержание Au, Ag, Pt — от 2 до 5 г/т. Предел обнаружения золота методом САЭС составляет 0,01 г/т.

Ключевые слова: атомно-эмиссионная спектроскопия; сцинтилляции; предел обнаружения; золото; спектры выгорания; стандартные образцы; лазерная абляция.

GOLD IN PYRITES AND SULFIDES BY SCINTILLATION ANALYSIS

© German A. Shevelev^{1*}, Emma N. Kamenskaya¹, Tleuzhan S. Turmagambetov¹,
Nikolay G. Kamensky²

¹ “Center Consalting” LLP, 258V, ul. Tlendieva, Almaty, 050036, Kazakhstan; *e-mail: german@c-consult.kz

² “Two Key” LLP, 258V, ul. Tlendieva, Almaty, 050036, Kazakhstan; e-mail: info@2k.kz

Received September 22, 2021. Revised September 22, 2021. Accepted November 24, 2021.

The method of scintillation atomic emission spectrometry (SAES) allows determination of the form of the element present in the sample and the size of inclusions in addition to the total content of the element in the direct analysis of powder samples. The aim of the work is to verify the expedience of using the direct method of analysis of individual gold particles in studying the possible forms of gold appearance in pyrites and sulfides, including the so-called “invisible” finely divided gold. The measurements were carried out both on individual pyrite single crystals, and on the samples of sulfide gold and brown coal deposits of Kazakhstan. The studies were carried out on a Grand-Potok complex (VMK Optoelektronika, Ltd.) equipped with a laser ablation system and a system for injection of aqueous solutions and aerosols samples. The samples of pyrite crystals of various sizes were analyzed to determine the content and speciation of gold in the samples. No dependence of the gold content on the crystal size was noted for all the studied pyrites. It is shown that gold and other precious metals are concentrated in the surface layers of pyrite crystals and in crystal lattice defects in the bulk of the crystal (according to SAES data during laser ablation of the sample in an arc discharge). The total content of gold in the bulk of pyrite crystals is about 2 g/ton, platinum and silver is less than 0.02 g/ton, while the content of Au, Ag, Pt on the surface ranges from 2 to 5 g/ton. The detection limit of gold determination by the SAES method is 0.01 g/ton. The SAES method can be used for determination of the gold speciation in pyrites and sulfides (finely dispersed, individual particles up to 1 µm or even less).

Keywords: atomic emission spectrometry; scintillation; time resolution; detection limit; gold; nanoparticles; emission spectra; reference materials; laser ablation.

Введение

Известно, что пирит является наиболее распространенным сульфидным минералом золоторудных месторождений. Хотя пирит признан природным концентратором золота, форма нахождения золота в пирите (видимое и рассеянное или «невидимое»), а также механизм его накопления до настоящего времени являются дискуссионными. Анализ форм нахождения золота в пиритах посвящено большое количество работ [1 – 12], основное внимание в которых уделено определению содержания и форм вхождения субмикроскопического и наноразмерного золота в пиритах и сульфидах с применением различных методов. Идентификацию и определение золота проводили методами электронно-зондового микроанализа (РСМА), атомно-эмиссионной и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС, ИСП-МС), атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС) и др. В работе [8] косвенным образом идентифицировали поверхностно-связанное и структурное золото в пиритах по удельной поверхности кристаллов и их массе, считая, что малоразмерные кристаллы имеют большую поверхность и содержат поверхностно-связанное золото, а крупные кристаллы содержат структурное (объемное) золото. Косвенным методом было установлено, что в исследованных пиритах в основном присутствует поверхностно-связанное золото. Прямое определение форм нахождения золота в пиритах проводят методом РСМА с использованием электронных микроскопов, оснащенных энергодисперсионными спектрометрами, а также методами масс-спектрометрии вторичных ионов (ВИМС) и масс-спектрометрии с лазерной абляцией (ЛА-МС). В случае РСМА чувствительность определения золота ограничена применением кремниевого энергодисперсионного детектора для регистрации эмиссии характеристического излучения золота и

составляет обычно от десятков г/т и выше. В работе [6] приведены аргументы в пользу того, что золото не может внедриться в решетку пирита из-за большого ионного радиуса атомов по отношению к межплоскостному расстоянию в кристаллах пирита. Кроме того, в экспериментах показано, что при кристаллизации большинства зерен пиритов растворенные примеси и золото выдавливаются на поверхность, в области каверн и дислокаций в виде субмикронных и наноразмерных частиц.

Однако методы, использованные для идентификации золота в указанных работах, позволяют определять только его валовое содержание в пиритах без уточнения нахождения частиц золота в объеме или на поверхности кристаллов. Известно небольшое количество работ, в которых описан прямой локальный анализ распределения золота в пиритах и сульфидах по глубине и поверхности отдельных кристаллов [9 – 12] с использованием методов ВИМС и ЛА-МС. В нашей работе для этой цели предложено использовать метод сцинтилляционной АЭС, регистрирующей вспышки отдельных частиц золота в пробах и позволяющей определять количество частиц, их крупность, содержание и связь золота с другими элементами. Используемый нами атомно-эмиссионный комплекс «Гранд Поток» («ВМК-Оптоэлектроника») [13], дополненный установкой лазерного пробоотбора, позволяет определять локальное распределение частиц золота как на поверхности, так и в объеме монолитных кристаллов пиритов и сульфидов.

Экспериментальная часть

Пробы кристаллов пиритов (рис. 1, 2), истертые до 200 меш (75 мкм), анализировали с использованием комплекса «Гранд Поток» путем просыпки их с транспортной ленты в дуговой разряд. Интенсивность сигнала золота на длине



Рис. 1. Фотографии образцов пирита с разными размерами кристаллов: *a* — 10 × 15 × 12 см; *б* — ~1 см; *в* — до 1 мм и менее (микросульфид)

Fig. 1. Pyrites samples (before grinding) with different crystal size: *a* — 10 × 15 × 12 cm; *b* — 1 cm; *c* — up to 1 mm and less (microsulfide)

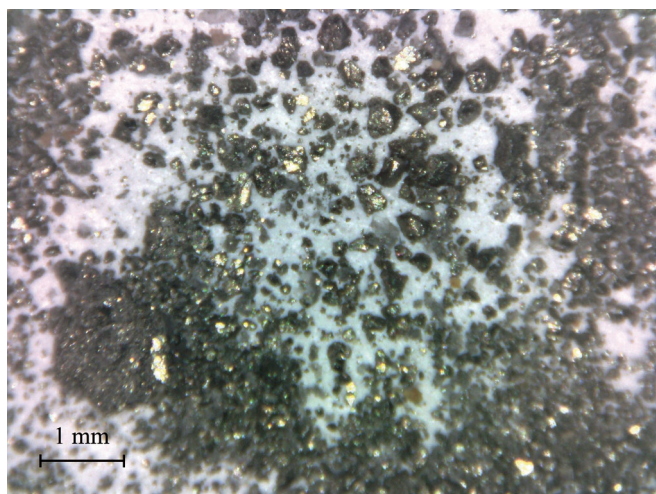


Рис. 2. Фотография кристаллов пирита с друзы на рис. 1, в, которые использовали в данной работе (размер кристаллов пирита — от 40 до 470 мкм)

Fig. 2. Pyrite crystals (from 40 up to 470 μm) taken from the nodule shown in Fig. 1c (before grinding)

волны 267,595 нм измеряли в течение поступления пробы в дуговой разряд (13 – 15 с) с дискретностью от 3 до 10 мс. При этом регистрировали общее количество частиц, интенсивности вспышек отдельных частиц и их общую интенсивность в образцах пиритов. Содержание Au в исследуемых образцах определяли по градуировочному графику, построенному с использованием стандартных образцов (зависимость интенсивности сигнала на длине волны 267,595 нм от концентрации Au). Описанный выше метод позволяет определять и другие примеси в пробах, при этом пределы обнаружения составляют: для Au до — 0,01 г/т, для Ag — до 0,05 г/т. Применение метода САЭС для определения примесей золота в бурых углях описано в работах [14, 15]. Метод САЭС позволяет как своего рода атомно-эмиссионный или сцинтилляционный микроскоп визуализировать наличие частиц золота или какого-либо другого элемента в пробе по их сцинтилляциям, т.е. определять «невидимое» золото в пиритах, сульфидах и других объектах. Проведенная в ТОО «Центр Консалтинг» модернизация прибора «Гранд Поток» позволяет использовать его в режиме сцинтилляций как микроскоп при исследовании растворов, водных аэрозолей и аэрозолей, полученных при лазерной абляции твердых материалов (включая кристаллические образцы, мономинералы, порошки рудных проб с локальностью от 1 мм и более).

Для исследований выбирали монокристаллы пиритов разного происхождения и разных размерностей (от 10 см по грани до единиц мм и менее) (см. рис. 1, 2).

Кроме того, исследовали пириты, входящие в состав углей. Монокристаллы пиритов гото-

вили к анализу согласно методике, описанной выше. Измерения проводили в режиме сцинтилляций. Измеряли интенсивности сигналов Au на длине волны 267,595 нм и примесей на длинах волн, близких к линии золота, для учета их мешающего влияния: Cr 267,598 нм, 267,568 нм; Fe 267,607 нм; Mn 267,585 нм; Ti 267,594 нм; U 267,588 нм; V 267,599 нм; W 267,571 нм, 267,586 нм. Общий состав исследуемых пиритов определяли с использованием рентгеновского энергодисперсионного спектрометра РЛП-21 (ТОО «Аспап Гео», Казахстан).

Обсуждение результатов

На рис. 3 приведены временные регистрограммы интенсивности линии Au 267,595 нм, зарегистрированные при просыпке в дуговой разряд проб, отобранных из объема кристаллов пирита разного размера. В течение времени выгорания пробы (13 – 15 с) на регистрограмме наблюдаются как отдельные вспышки интенсивности (до 15 отн.ед.), так и группы сцинтилляций примерно одинаковой амплитуды в виде шумового спектра. Если частицы Au мелкие (менее 1 мкм), соответствующие им сцинтилляции не заметны на фоне шумового спектра. Для кристалла пирита размером до 10 см по грани (см. рис. 1, а) минимальный размер частиц золота составляет 0,2 – 0,5 мкм, что подтверждает калибровка частиц с помощью микроскопа (0,2 – 0,4 мкм).

Распределение интенсивности линий, далеких от линии золота (Cr 267,568 нм; Fe 267,607; W 267,571 нм; Mn 267,585 нм), носит сплошной характер для всех изученных нами монокристаллов пирита. Сцинтилляции Au становятся видны при разбавлении пробы в 2 раза буфером (рис. 4). В том случае, когда частицы золота крупные (десятки мкм и более), отдельные вспышки золота становятся видны на далеких от линии золота линиях. При исследовании распределения драгметаллов в крупных кристаллах пирита (см. рис. 1, а) было отмечено, что при анализе материала, соскобленного с поверхности кристалла, видны вспышки Au, Ag, Pt (рис. 5).

В случае рассмотрения распределения интенсивности линий, близких к линии золота (Co 267,598 нм; Cr 267,568 нм; Ti 267,594 нм; U 267,588 нм; W 267,586 нм), на регистрограммах присутствуют вспышки интенсивности, соответствующие по времени испарению частиц Au, за счет наложения линии золота на эти линии.

Эксперименты также показали, что для частиц золота менее 0,1 мкм, сцинтилляции которых не выделяются на фоне шумового спектра, разбавление пробы буфером, не содержащим Au, в 2 – 10 раз (интенсивность шумового спектра не должна превышать 0,1 – 0,5 отн.ед.) позволяет

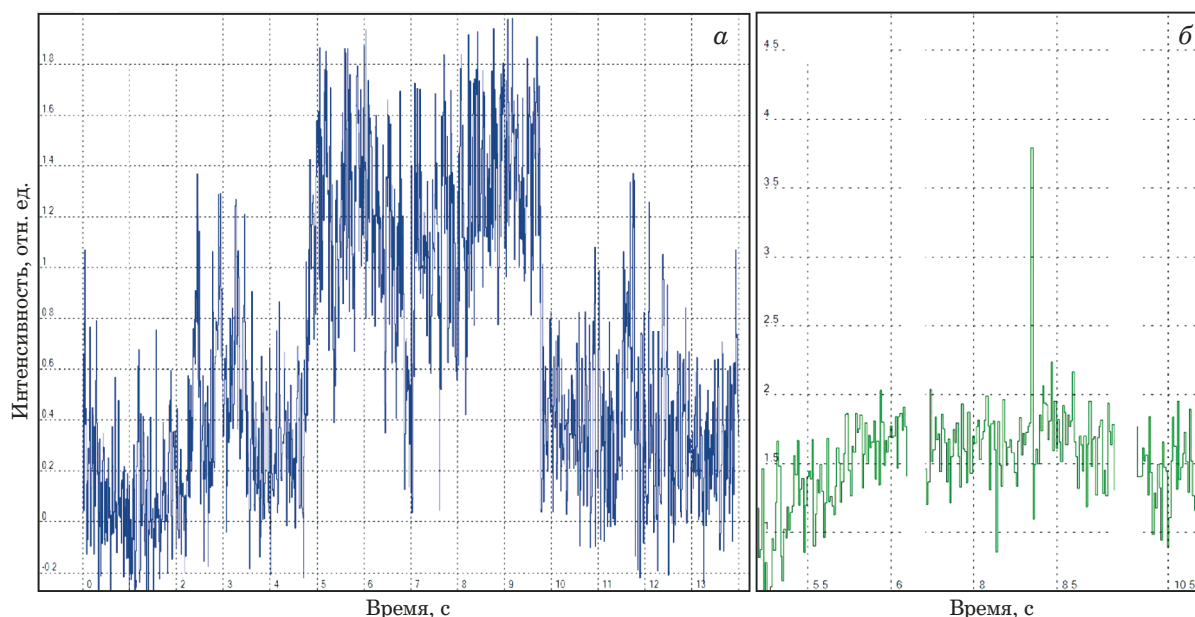


Рис. 3. Временные регистрограммы интенсивности линии Au 267,595 нм для проб, отобранных из объема кристаллов пирита разного размера: *a* — крупного кристалла (рис. 1, *a*); *б* — кристалла малой друзы (рис. 1, *б*)

Fig. 3. Scintillation spectra of the pyrite samples. Time dependence of the intensity of Au 267.595 nm line for the samples taken from the bulk of pyrite crystals of different sizes: *a* — large crystal (Fig. 1*a*); *b* — crystal of a small nodule (Fig. 1*b*)

зарегистрировать вспышки интенсивности от этих частиц. При определении общего содержания золота в этом случае необходимо учитывать фактор разбавления, который выбирают экспериментально.

Следует отметить, что хотя в монокристаллах пиритов основным элементом является железо, матрица не оказывает значительного влияния на сцинтилляции золота в отличие от примесных элементов (W, Cr, Co, V). Наибольшее влияние оказывает W (от 1 % и более), однако оно нивелируется при разбавлении буфером.

В ходе экспериментов было установлено, что для всех исследованных монокристаллов не отмечено увеличения содержания Au в мелких кристаллах пирита, как это описано в работе [8], если это не касается одного месторождения. В исследованных сульфидах, которые по данным РФА содержат от 4 до 10 % меди, цинка, железа и серы, характер сцинтилляций такой же, как и в случае микросульфида пиритов. Не отмечено также связи золота с Cu и Zn по данным САЭС (см. рис. 1, *в*). Вероятнее всего, золото в этом образце связано с пиритом.

Анализ материала, соскобленного с поверхности крупных кристаллов пирита, методом САЭС показал общий характер распределения Au, Ag, и Pt в пиритах. Крупные частицы золота, больше 10 – 15 мкм, отсутствуют. В объеме кристалла пирита (см. рис. 1, *а*) отдельных вспышек Au, Ag, Pt не наблюдается. Шумовой спектр сцинтилляций обусловлен излучением Fe на длине волны 267,607 нм. При разбавлении данной пробы бу-

фером в 2 раза наблюдается резкое уменьшение шума и появление сцинтилляций Au, Ag, Pt (см. рис. 4). Одной из причин этого является понижение температуры дугового разряда и преимущественное выгорание золота с поверхности частиц пирита (сам пирит выгорает при более высокой температуре), а также выгорание примесей хрома, вольфрама, кобальта и т.д. Кроме того, при анализе образцов, содержащих самородное (кварцевожильное) золото (месторождение Гагаринское), наблюдаются сцинтилляции, соответствующие частицам свободного золота до 100 и более мкм (с интенсивностью до 100 и более отн.ед.), как и при анализе проб угля месторождения Шоптыколь, в которых золото было сконцентрировано путем прокаливания. Аналогичная ситуация имеет место для месторождения Бакырчик, где золото связано с пиритом, а частицы золота по данным сцинтилляционного анализа мелкие, до 10 мкм и менее.

При анализе материала, соскобленного с поверхности кристалла (см. рис. 1, *а*), на регистрограмме наблюдаются вспышки интенсивности от 10 до 30 отн.ед., соответствующие частицам Au, Pt и Ag (см. рис. 5). Этот эффект увеличения содержания драгоценных металлов на поверхности кристалла пирита подтверждает выводы, сделанные в работе [6] о том, что растворенные примеси при его кристаллизации концентрируются на поверхности, а также в областях повреждений и дислокаций внутри кристалла. На рис. 6 показаны скопления частиц Au, обнаруженные в объеме кристалла (см. рис. 1, *а*) при лазерной абляции

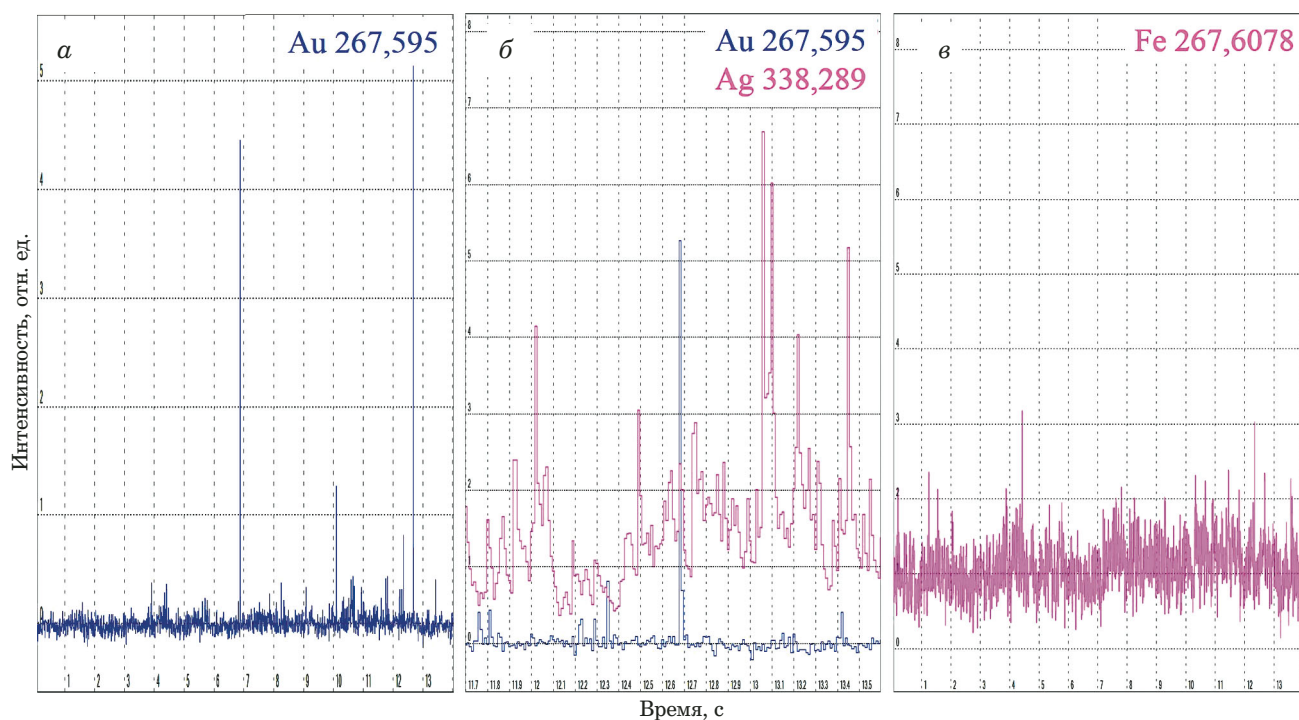


Рис. 4. Зависимость интенсивности линий от времени при анализе методом САЭС проб из объема крупного кристалла пирита (рис. 1, *a*), разбавленных в 2 раза буфером: *a* — Au; *б* — Au и Ag, частицы золота и серебра не связаны; *в* — Fe

Fig. 4. Scintillation spectra of the pyrite samples from the crystal shown in Fig. 1*a* after 2 times dilution with buffer: *a* — Au; *b* — Au and Ag (separated particles of Au and Ag); *c* — continuous background of Fe scintillations

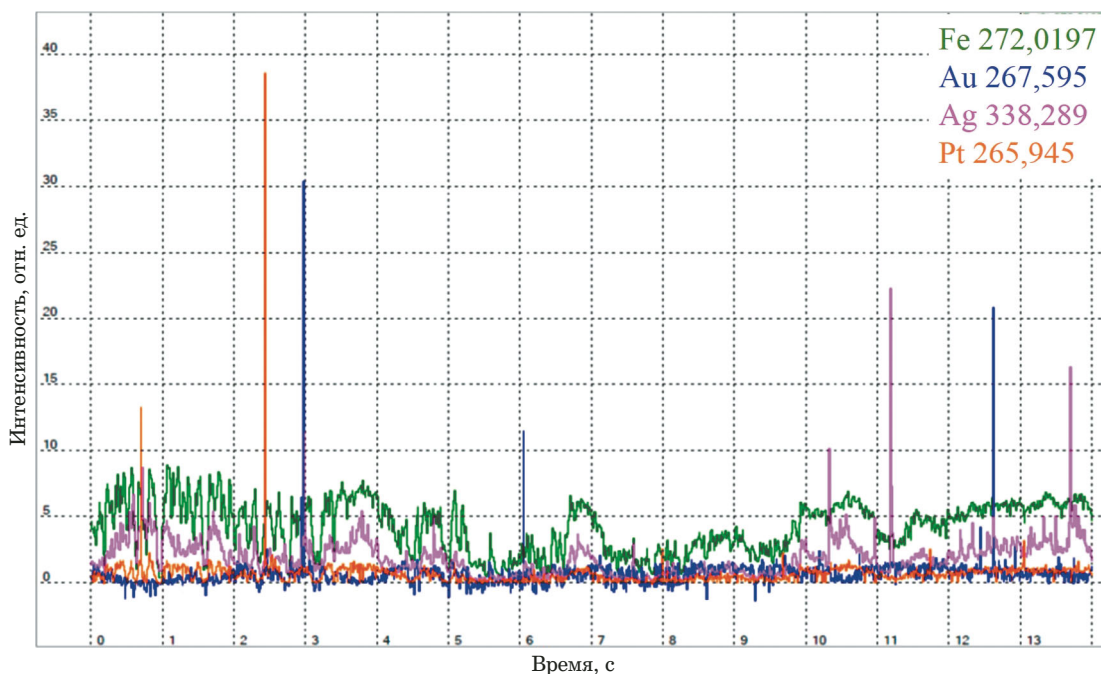


Рис. 5. Временные регистрограммы интенсивности линий ряда элементов при анализе проб с поверхности кристалла пирита (см. рис. 1, *a*) методом САЭС

Fig. 5. Time dependences of the line intensity for several elements obtained by SAES analysis of the samples from the surface of the large pyrite crystal

пробы и просыпке полученного аэрозоля в дуговой разряд комплекса «Гранд Поток». Диаметр сканирования лазерного луча — 2 мм. Размер

скопления золота по оценке составляет примерно $0,040 \times 1,2 \times 0,17$ мм. По результатам сцинтилляционного анализа в объеме кратера присутст-

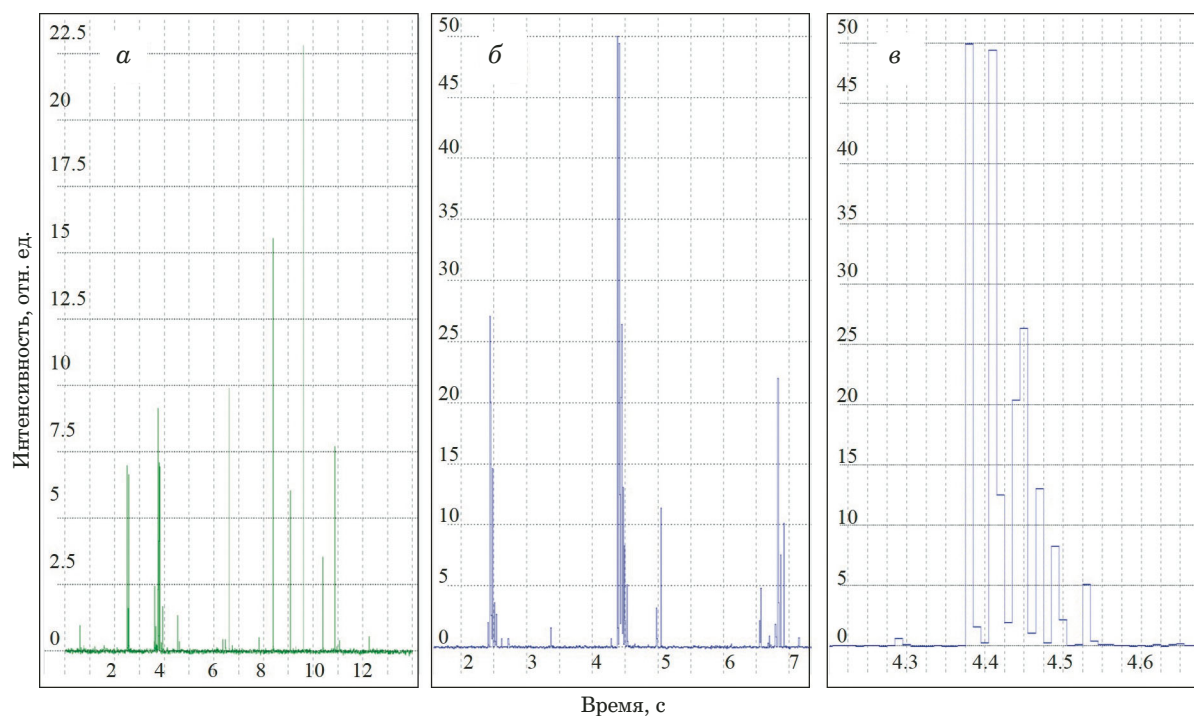


Рис. 6. Фрагменты регистрограммы интенсивности линии золота при лазерной обליации пробы из объема кристалла пирита: *a* — присутствуют как отдельные частицы золота, так и скопления частиц; *b* — большие скопления частиц золота; *c* — фрагмент большого скопления частиц золота

Fig. 6. Scintillation spectrum of Au of the sample taken from the bulk of a pyrite crystal (Fig. 1) obtained by laser ablation: *a* — both individual Au particles and clusters of Au particles are present; *b* — large clusters of Au particles; *c* — a fragment of a large cluster of Au particles

вует только Au (около 2 г/т), а содержание Pt и Ag меньше 0,02 г/т, в то время как на поверхности кристалла содержание Au, Ag, Pt составляет от 2 до 5 г/т. В объеме кристалла пирита обнаружено Au и Ag > 1 г/т (см. рис. 4, б). Это также свидетельствует о том, что Au и Ag мигрируют к поверхности и дислокациям в кристаллах пирита при их кристаллизации. Поскольку в кристаллах пирита расстояние между атомами серы равно 2,05 Å, а размеры атомов Au, Pt и Ag 1,37, 1,38 и 1,17 Å соответственно, эти атомы могут мигрировать в объеме пирита к поверхности и к нарушениям кристаллической структуры. Кроме того, по результатам анализа (см. рис. 6) видно, что интенсивности вспышек золота в скоплении меньше 10 отн.ед. Крупных частиц (вспышек) золота не наблюдается. Минимальный размер частиц золота в пиритах по результатам САЭС при разбавлении проб буфером или при лазерной абляции составляет примерно 0,2 – 0,3 мкм. Это также свидетельствует о том, что в объеме кристаллов пирита присутствует только мелкое, наноразмерное «невидимое» золото. Наличие в кристаллах пирита Au и Ag подтверждают данные САЭС осадков с разрядной камеры: видны только сцинтилляции Au и Ag, сцинтилляций Pt не наблюдается, так как давление ее насыщенных паров на два порядка величины меньше, чем Au и Ag.

Закключение

Таким образом, проведенные исследования показали возможность применения метода САЭС для определения формы нахождения золота в пиритах и сульфидах, а также для регистрации и исследования отдельных частиц золота и других драгоценных металлов и их связи друг с другом.

Для всех исследованных пиритов не отмечено зависимости содержания золота от размеров кристалла. Показано, что крупных частиц золота в объеме кристаллов пирита нет: в основном это частицы размером от единиц мкм и менее. Минимальный размер частиц золота в исследованных пиритах составляет не больше 0,1 – 0,5 мкм.

Установлено, что золото и другие драгоценные металлы сосредоточены в поверхностных слоях кристаллов пирита и в дефектах кристаллической решетки. При этом интенсивности вспышек частиц могут достигать 30 отн.ед. В объеме некоторых кристаллов пиритов при лазерной абляции пробы обнаружены скопления частиц золота в трещинах или полостях с характерными размерами в доли мм. При истирании кристаллов пирита до размеров порядка 75 – 100 мкм и анализе порошка методом САЭС предел обнаружения золота составляет 0,01 г/т.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Б. С. Пирит золоторудных месторождений. — М.: Наука, 1992. — 143 с.
2. Беликова Г. И., Салихов Д. Н., Бердников П. Г. К вопросу об изоморфизме золота в пирите / Геологический сборник № 3. Информационные материалы ИГ УНЦ РАН. 2003. С. 190 – 193. http://ig.ufaras.ru/File/E2003/03301_03.pdf (дата обращения 22.09.2021).
3. Вареничев А. А., Комогортцев Б. В., Громова М. П. Сырьевая база золота России / Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 8. С. 212 – 220.
4. Викентьев И. В. Невидимое и микроскопическое золото в пирите: методы исследования и новые данные для колчеданных руд Урала / Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 4. С. 267 – 298. DOI: 10.7868/S001677701504005X
5. Плотинская О. Ю. Минералогия благородных металлов в рудах золото-порфирового месторождения Юбилейное (Казахстан) / Минералогия. 2020. Т. 6. № 3. С. 44 – 53. DOI: 10.35597/2313-545X-2020-6-3-4
6. Рождествина В. Н., Неронский Г. И., Бородавкин С. И., Федорова Н. В. Формы вхождения золота в пирит / Труды международной научной конференции «Федоровская сессия-2008». Санкт-Петербург, 2008. С. 92 – 95. <http://minsoc.ru/FilesBase/2008-2-26-0.pdf> (дата обращения 22.09.2021).
7. Сидорова Н. В., Викентьев И. В., Абрамова В. Д., Ковальчук Е. В. Золото и другие элементы-примеси в пирите Березовского месторождения, Средний Урал / Литосфера. 2019. Т. 19. № 2. С. 327 – 336. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-2-327-336
8. Таусон В. Л., Кравцова Р. Г., Смагунов Н. В. и др. Структурное и поверхностное золото в пиритах месторождений разных генетических типов / Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 2. С. 350 – 369. DOI: 10.15372/GiG201400210
9. Morishita Y., Shimada N., Shimada K. Invisible gold in arsenian pyrite from the high-grade Hishikari gold deposit, Japan: Significance of variation and distribution of Au/As ratios in pyrite / Ore Geol. Rev. 2018. Vol. 95. P. 79 – 93. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.02.029
10. Morishita Y., Hammond N. Q., Momii K., et al. Invisible Gold in Pyrite from Epithermal, Banded-Iron-Formation-Hosted, and Sedimentary Gold Deposits: Evidence of Hydrothermal Influence / Minerals. 2019. Vol. 9. N 7. P. 447. DOI: 10.3390/min9070447
11. Pokrovski G. S., Kokh M. A., Proux O., et al. The nature and partitioning of invisible gold in the pyrite-fluid system / Ore Geol. Rev. 2019. Vol. 109. P. 545 – 563. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.04.024
12. Thella J. S. The influence of mineralogy and surface chemistry on flotation of Cortez complex carbonaceous double refractory gold ore / A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy at The University of Queensland. — Sustainable Minerals Institute Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 2018. — 271 p.
13. Дзюба А. А., Лабусов В. А., Васильева И. Е. и др. Аналитические возможности спектрального комплекса «Гранд-Поток» при сцинтилляционном определении содержания золота и серебра в геологических пробах / Аналитика и Контроль. 2017. Т. 21. № 1. С. 6 – 15. DOI: 10.15826/analitika.2017.21.1.001
14. Шевелев Г. А., Василенко Л. И., Каменская Э. Н. и др. Благородные и редкие металлы в некоторых месторождениях угля Казахстана / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1. Ч. II. С. 38 – 45. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-38-44
15. Шевелев Г. А., Турмагамбетов Т. С., Каменский Н. Г. Аналитические и методические инновации, применяемые в ТОО «Два Кей». — Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2019. — 80 с.

REFERENCES

1. Andreev B. S. Pyrite of gold deposits. — Moscow: Nauka, 1992. — 143 p. [in Russian].
2. Belikova G. I., Salihov D. N., Berdnikov P. G. About the question of gold isomorphism in pyrite / Geological collection No. 3. Information materials. IG UFRC RAS, 2003. P. 190 – 193 [in Russian]. http://ig.ufaras.ru/File/E2003/03301_03.pdf (accessed September 22, 2021).
3. Varenichev A. A., Komogortsev B. V., Gromova M. P. The raw material base of gold of Russia / Gornyy Inf.-Analit. Byull. 2016. N 8. P. 212 – 220 [in Russian].
4. Vikentev I. V. Invisible and microscopic gold in pyrite: Methods and new data for massive sulfide ores of the Urals / Geol. Rudn. Mestorozhd. 2015. Vol. 57. N 4. P. 237 – 265 [in Russian]. DOI: 10.1134/S1075701515040054
5. Plotinskaya O. Yu. Mineralogy of precious metals in ores of the Yubileinoe porphyry gold deposit (Kazakhstan) / Mineralogiya. 2020. Vol. 6. N 3. P. 44 – 53 [in Russian]. DOI: 10.35597/2313-545X-2020-6-3-4
6. Rozhdestvina V. I., Neronsky G. I., Borodavkin S. I., Fedorova N. V. Forms of the Gold entry in pyrite / Proc. of Int. Sci. Conf. “Fedorov Session 2008”. The Russian Mineralogical Society, St. Petersburg, 2008. P. 92 – 95 [in Russian]. <http://minsoc.ru/FilesBase/2008-2-26-0.pdf> (accessed September 22, 2021).
7. Sidorova N. V., Vikent'ev I. V., Abramova V. D., Koval'chuk E. V. Gold and other impurity elements in pyrite from the Berzovskoe deposit in the Middle Urals / Litosfera. 2019. Vol. 19. N 2. P. 327 – 336 [in Russian]. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-2-327-336
8. Tauson V. L., Kravtsova R. G., Smagunov N. V., et al. Structurally and super-ficially bound gold in pyrite from deposits of different genetic types / Rus. Geol. Geophys. 2014. Vol. 55. N 2. P. 273 – 289. DOI: 10.1016/J.RGG.2014.01.011
9. Morishita Y., Shimada N., Shimada K. Invisible gold in arsenian pyrite from the high-grade Hishikari gold deposit, Japan: Significance of variation and distribution of Au/As ratios in pyrite / Ore Geol. Rev. 2018. Vol. 95. P. 79 – 93. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.02.029
10. Morishita Y., Hammond N. Q., Momii K., et al. Invisible Gold in Pyrite from Epithermal, Banded-Iron-Formation-Hosted, and Sedimentary Gold Deposits: Evidence of Hydrothermal Influence / Minerals. 2019. Vol. 9. N 7. P. 447. DOI: 10.3390/min9070447
11. Pokrovski G. S., Kokh M. A., Proux O., et al. The nature and partitioning of invisible gold in the pyrite-fluid system / Ore Geol. Rev. 2019. Vol. 109. P. 545 – 563. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.04.024
12. Thella J. S. The influence of mineralogy and surface chemistry on flotation of Cortez complex carbonaceous double refractory gold ore / A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy at The University of Queensland. — Sustainable Minerals Institute Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 2018. — 271 p.
13. Dzyuba A. A., Labusov V. A., Vasil'eva I. E., et al. Analytical capabilities of “Grand-Potok” spectral system for the scintillation determination of gold and silver in geo-logical samples / Analit. Kontrol. 2017. Vol. 21. N 1. P. 6 – 15 [in Russian]. DOI: 10.15826/analitika.2017.21.1.001
14. Shevelev G. A., Vasilenko L. I., Kamenskaya E. N., et al. Noble and rare metals in some coal deposits of Kazakhstan / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2019. Vol. 85. N 1. Part II. P. 38 – 45 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-38-44
15. Shevelev G. A., Turmagambetov T. S., Kamensky N. G. Analytical and methodological innovations applied in Two Key LLP. — Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2019. — 80 p. [in Russian].