

УДК 553.411:549.324.31

## ПИРИТЫ ЗАПАДНОГО ФЛАНГА СУХОЛОЖСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО ПОЛЯ (ЛЕНСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН)

Пшеничкин Анатолий Яковлевич<sup>1</sup>,  
paya@tpu.ru

Гаврилов Роман Юрьевич<sup>1</sup>,  
GavrilovRY@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью внедрения в практику геологоразведочных работ новых комплексных методов прогнозирования золоторудных объектов.

**Цель работы:** получение информации о кристалломорфологии, термо-эдс, химическом составе и элементах-примесях пиритов из рудной зоны западного фланга Сухоложского рудного поля.

**Методы исследования:** кристалломорфология, термо-эдс, рентгеноспектральный анализ, статистическая обработка геохимических данных по образцам кристаллов пирита, отобранных из рудной зоны западного фланга Сухоложского рудного поля.

**Результаты.** Установлено, что изученные кристаллы пирита чаще всего встречаются в виде кубов. Нередко на кристаллах встречается слабо развитая грань {210}. Пириты характеризуются исключительно дырочным типом проводимости с разбросом значений термо-эдс от 27 до 83 мВ и близкими средними значениями в пределах 58,4...67,0 мВ. Химический состав кристаллов пирита отличается от их стехиометрической формулы, что свидетельствует о вхождении в структуру минерала изоморфных и механических примесей. Рентгеноспектральным анализом установлены элементы, постоянно присутствующие в пирите: Co, Ni, Cu, Zn, As, Pb. Наличие элементов-примесей в пиритах, характерных для руд месторождения Сухой Лог, и, прежде всего, As свидетельствует о синрудном образовании пирита в процессе гидротермально-метасоматического рудообразования и его, возможно, изоморфном вхождении в структуру минерала. В качестве механических примесей в пирите установлены: пирротин, халькопирит, сфалерит, галенит, арсениопирит, торианит. На основании изучения кристалломорфологии, термо-эдс, химического состава пиритов и распределения в них элементов-примесей сделан вывод о верхнерудном уровне эрозионного среза рудной зоны западного фланга Сухоложского рудного поля.

### Ключевые слова:

Золотое оруденение, пирит, кристалломорфология, термо-эдс, химический состав, элементы-примеси.

### Введение

Комплекс методов поисков и прогнозирования рудных объектов включает как массово применяемые: литогеохимия, магнитометрия, электрометрия и др., так и достаточно редко используемые: биогеохимия, атмогеохимия и др., методы. Одним из методов, используемых незаслуженно редко, является топоминералогический анализ, позволяющий выявлять закономерности формирования и распределения минералов в различных геологических системах [1–3].

Наиболее распространенным минералом на золоторудных объектах и, как следствие, одним из самых изученных является пирит. Анализ строения пирита, его состава и физических свойств позволяет получать дополнительную информацию об изучаемых объектах, что, в свою очередь, способствует более успешному прогнозированию оруденения на потенциально рудоносных площадях.

Результаты топоминералогических исследований пиритов месторождений различных видов полезных ископаемых опубликованы в [1–15].

Многолетние исследования пиритов золоторудных месторождений различного генезиса сотрудниками Томского политехнического университета [16–20] позволили установить ряд закономерностей.

Кристалломорфология пирита закономерно изменяется в разрезе рудных тел и месторождений. Так, пириты из верхних частей рудных тел и месторождений имеют преимущественно кубический габитус кристаллов, где грань {210} в комбинации кристалла или отсутствует, или слабо и неравномерно развита. В средних частях рудных тел и особенно в «рудных столбах», где содержание золота максимальное, грань {210} в кристаллах становится габитусной и здесь преобладают пириты пентагондодекаэдрического габитуса. А в прикорневых частях рудных тел кристаллы пирита имеют кубический и куб-пентагондодекаэдрический габитусы [3, 16].

Пирит относится к минералам с примесным типом проводимости, а стехиометрически чистый пирит обладает дырочным типом проводимости. Одно- и двухвалентные элементы (Ag, Sb, Hg, Pb, Zn, Cu), изоморфно входящие в структуру минерала, уменьшают или увеличивают значение дырочной составляющей термо-эдс (ТЭДС), а трёх- и четырёхвалентные элементы (Ni, Co, As, Ti, W), изоморфно замещающие железо или серу, изменяют дырочную проводимость пирита на электронную. Кроме того, установлено [16, 17, 19, 20], что на величину и знак ТЭДС пирита влияют и другие факторы: разность температур между холодным и го-

рячим электродами (с увеличением разности температур между электродами увеличивается как дырочная, так и электронная проводимость), естественное и искусственное радиоактивное облучение минерала, кристаллографическое направление кристалла, в котором производится измерение, температура и глубина формирования месторождения и, соответственно, изоморфная ёмкость кристаллической решетки пирита.

Проведенные исследования ТЭДС пиритов из руд и околорудных метасоматитов золоторудных месторождений разного генезиса показали [16, 20], что ТЭДС является чувствительным типоморфным признаком и закономерно меняется в пространстве и во времени от пиритов с электронной проводимостью из ранних высокотемпературных минеральных ассоциаций и прикорневых частей рудных тел к пиритам со смешанным типом проводимости из среднетемпературных минеральных ассоциаций и средних частей рудных тел и к пиритам с дырочным типом проводимости из заключительных этапов формирования месторождения и верхних частей рудных тел. По ТЭДС пиритов можно судить об условиях формирования месторождений, уровне эрозионного среза рудных тел и, следовательно, их перспективности на глубину и фланги.

Для золоторудных месторождений типоморфным признаком является набор повышенных концентраций специфичного комплекса элементов-примесей как в пиритах руд, так и в околорудных метасоматитах [19, 20]. Концентрации элементов-примесей закономерно изменяются с глубиной рудных тел. Так, пириты верхних частей рудных тел и надрудных ореолов обогащены Ag, Hg, Sb, Ba; пириты средних частей рудных тел и рудных столбов максимально обогащены специфичным комплексом примесных элементов, характерных для золоторудных месторождений, – Ag, Cu, Pb, Zn, As и особенно Au; в прикорневых частях рудных тел в пиритах накапливаются Ni, Co, Ti, нередко As. Пириты околорудных метасоматитов золоторудных месторождений содержат тот же набор элементов-примесей, что и пириты руд, но в более низких концентрациях. По падению рудных тел концентрация элементов в пиритах изменяется часто волнообразно с амплитудой волны 240...280 м в соответствии со структурно-минералогической зональностью месторождения.

Пириты Сухоложского рудного поля в различные годы изучались В.А. Бурыком, R.R. Large с соавторами, А.М. Гавриловым и С.Г. Кряжевым и другими исследователями.

В одной из последних работ, посвященных особенностям руд месторождения Сухой Лог [21], обобщены сведения об изученности пиритов, полученные предшественниками, а также приведены собственные результаты исследования (кристалломорфология, химический состав, ТЭДС, изотопный состав серы).

Данное исследование направлено на получение комплексной характеристики крупнокристалли-

ческих пиритов западного фланга Сухоложского золоторудного поля, включающее изучение кристалломорфологии, ТЭДС, химического состава пиритов, содержания в них элементов-примесей и их распределения в кристаллах.

### Геологическое строение рудного поля

Строение и вещественный состав пород и руд Сухоложского рудного поля подробно описаны во многих публикациях [22–32 др.]. Ниже приводится краткая характеристика его западной части (рис. 1).

Рудное поле расположено в пределах Бодайбинского синклинория Кропоткинского рудного узла. Его западный фланг вскрыт поверхностными горными выработками и скважинами колонкового бурения.

Главной структурой, контролирующей размещение оруденения, является Сухоложская антиклиналь. Она представляет собой линейную, сильно сжатую асимметричную складку, вытянутую в субширотном направлении и запрокинутую на юг. Северное и южное крылья антиклинали падают под углами 15...20° и 30...45° соответственно.

Рудные тела месторождения залегают в отложениях верхней подсвиты хомолхинской свиты и нижней подсвиты имняхской свиты, сложенных песчаниками, алевролитами и филлитами различной зернистости. Породы свит подверглись региональному метаморфизму хлорит-серицитово-субфации зеленосланцевой фации.

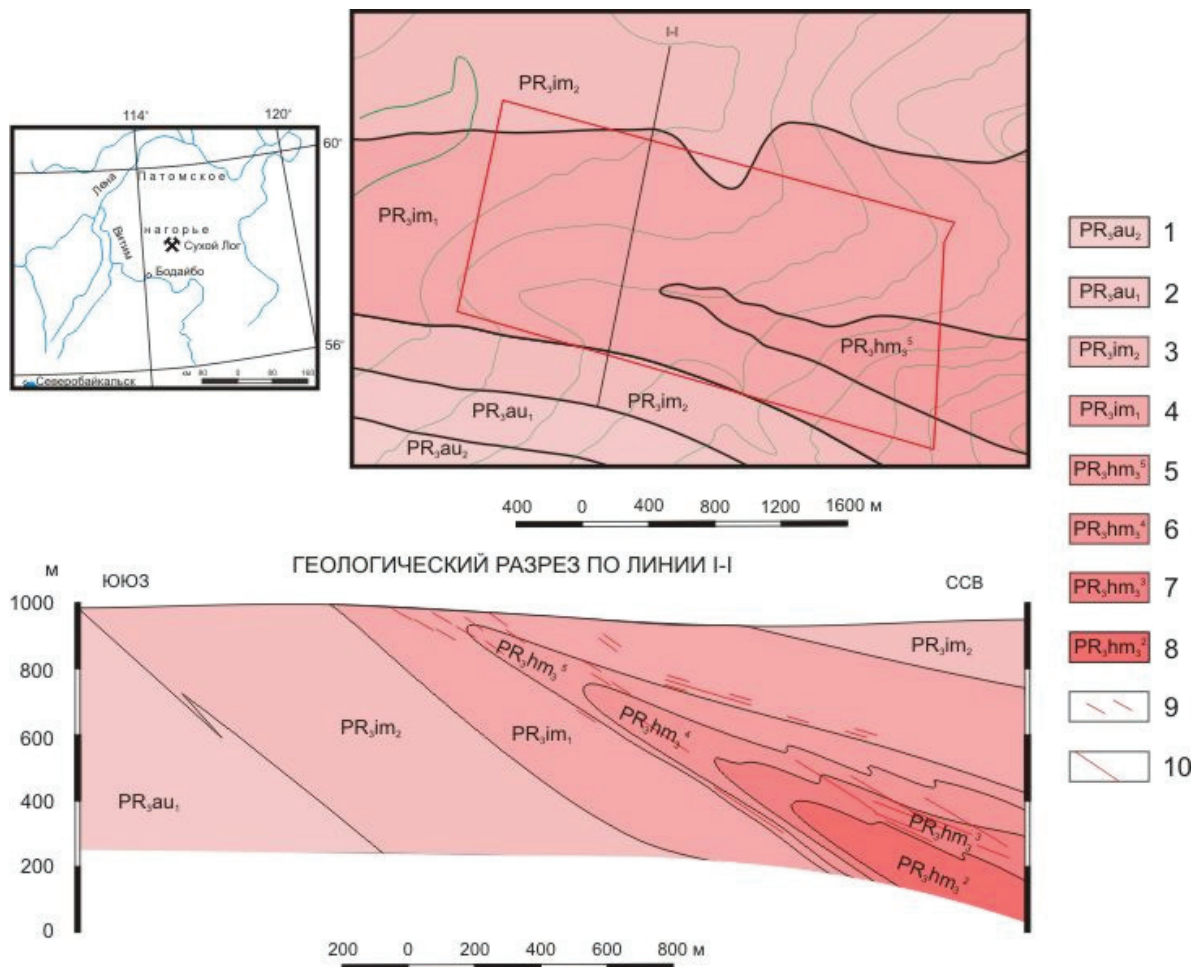
Проявление гидротермально-метасоматических процессов выражено в образовании карбонатной, сульфидной и кварцево-жильной минерализаций. Оруденение приурочено к зонам разрывно-складчатых дислокаций, заполненных прожилково-вкрапленной кварцево-сульфидной и кварцево-жильной минерализациями.

### Методика исследования

Кристалломорфология пирита изучена по образцам, отобранным из рудной зоны западного фланга Сухоложского рудного поля.

Определение термо-эдс пиритов проводилось в лаборатории геологии золота Томского политехнического университета на установке, совмещенной с бинокулярным микроскопом МБС-10, специально приспособленной для измерения термо-эдс мелких фракций минералов-полупроводников размером 0,2...1,0 мм. Холодный электрод представлен массивной латунной пластиной размером 20×10×0,5 см (для быстрого его охлаждения), горячий латунный электрод – игловидной формы. Электроды соединены с измерительным цифровым миллиамперметром М-800 F, автоматически показывающим электронный (–n) или дырочный (+p) тип проводимости минерала.

Измерение проводилось при постоянной разности температур между холодным и горячим электродами в 150 °С. Калибровка электрода (установление разности температур между холодным и го-



**Рис. 1.** Схема геологического строения западного фланга Сухоложского рудного поля по [33] с дополнениями авторов. Условные обозначения: аунакитская свита (1, 2): 1 – средняя подсвита, прослои кварцитовидных песчаников; 2 – нижняя подсвита: переслаивание сланцев углеродистых, песчаников кварцевых, известковистых и известняков; имнякская свита (3, 4): 3 – верхняя подсвита: известняки белые, кремовые с зеленоватым оттенком, слои сланцев известковистых; 4 – нижняя подсвита: ритмичное переслаивание сланцев, песчаников известковистых, слои известняков; хомолхинская свита (5–8): 5 – пятый горизонт: сланцы филлитовидные, углеродистые прослои алевролитов и песчаников кварцево-слюдистых; 6 – четвертый горизонт: алевролиты кварцево-слюдистые; 7 – третий горизонт: ритмичное переслаивание сланцев углеродистых, алевролитов и песчаников кварцево-слюдистых; 8 – второй горизонт: сланцы высокоуглеродистые; 9 – рудовмещающие мелкие разрывные нарушения; 10 – контур лицензионной площади

**Fig. 1.** Scheme of geological structure of the western flank of the Sukholozhsky ore field by [33] with the additions of the authors. Legend: aunakitskaya suite (1, 2): 1 is the medium subsuite, intercalations of quartzite sandstones; 2 is the lower subsuite: interbedding of shales of carbonaceous, quartz sandstone, calcareous and limestone; imnyakhskaya suite (3, 4): 3 is the top subsuite: limestones white, cream with a greenish tinge, layers of shaly calcareous; 4 is the lower subsuite: rhythmic interbedding of shales, calcareous sandstones, limestone layers; khomolkhinskaya suite (5–8): 5 is the fifth horizon: phyllite-like shales, carbon interlayers of siltstones and quartz-mica sandstones; 6 is the fourth horizon: siltstone quartz-mica; 7 is the third horizon: rhythmic interbedding of shales of carbonaceous, siltstone and sandstone quartz-micaceous; 8 is the second horizon: high-carbon schists; 9 is the ore-bearing small breaking disruptions; 10 is the contour of the license area

рячим электродами и типа проводимости) осуществлялась с помощью эталонного образца – галенита, который имеет только электронный тип проводимости. Через каждые 10–15 замеров проводились контрольные замеры эталонного галенита. Время одного замера ТЭДС минерала составляло 15...20 с. В каждой пробе производилось 30–50 замеров ТЭДС зерен или кристалликов пирита.

Рентгеноспектральный анализ минерала выполнялся на энергодисперсионном рентгенофлуо-

ресцентном микроскопе (ЭДРФ, модель HORIBA XGT-7200). Данный прибор позволяет выполнять количественный химический анализ широкого спектра элементов от Na ( $Z=11$ ) до U ( $Z=92$ ). Площадь волновода (сканирующего луча) составляла 10 мкм. Измерения выполнялись при мощности излучения 50 кВ, силе электрического тока 1 мА, время определения содержания химических элементов в каждой точке составляло 50 с.

Для изучения химического состава пиритов (рис. 2) и распределения в них элементов-приме-



сей из трех кристаллов были изготовлены полированные шлифы. Анализируемая поверхность кристалла была представлена плоскостью параллельной плоскости грани куба. Образцы полировались пастами на основе карбида кремния, после чего тщательно протирались спиртом. Таким образом, заражение образцов (полированных шлифов) элементами, содержащимися в абразивных пастах, было сведено к минимуму. По всей полированной площади каждого кристалла производились измерения содержаний химических элементов в точках, распределенных по равномерной сетке, состоящей из 225 точек (15×15) для первого кристалла (рис. 2, фото справа, образец 3-1), и из 49 точек (7×7) для второго и третьего кристаллов соответственно (образцы 3-2 и 3-3). Часть точек находилась за пределами изучаемого объекта и, соответственно, не учитывалась при построении карт распределения содержаний химических элементов и расчете статистических параметров.

На основании полученных аналитических данных в программе Surfer строились схемы распределения содержаний основных элементов и элементов-примесей пиритов.

Проведен анализ нескольких десятков проб пирита. Изучены кристалломорфология, ТЭДС, химический состав пиритов и распределение в кристаллах элементов-примесей.

#### Результаты исследования

Пириты западного фланга Сухоложского рудного поля встречаются в виде кубов {100} или кубов со слабо развитыми гранями пентагондодекаэдра – {100}+{210}, размером от 1,0 до 4,0 см. Редкие кристаллы имеют правильные формы. Часто они имеют уплощенную форму или слабо псевдоромбоэдричны. Грани {100} покрыты сложным узором слойков роста паркетного типа. Грани {210} слабо развиты и также покрыты слойками роста. Слойки роста на гранях кристаллов очень тонкие и

не имеют закономерных очертаний относительно ребер кристаллов. Грани кристаллов часто несут незакономерные отпечатки вмещающих пород (аргиллитов, филлитов) и кварца. Внутреннее строение кристаллов не всегда плотное за счёт захвата вмещающих пород, излом слабо раковистый.

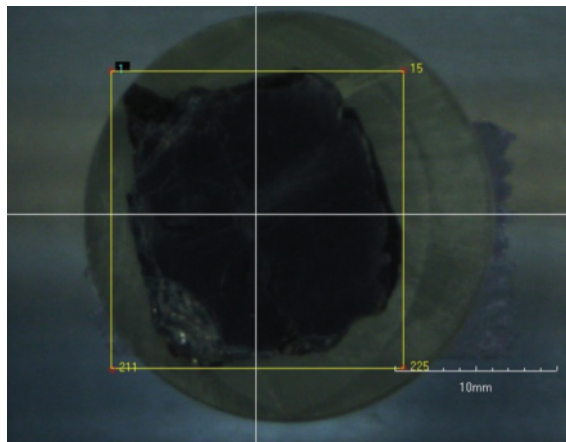
Проведенное исследование ТЭДС пиритов показало, что пириты имеют только дырочный тип проводимости с разбросом значений ТЭДС от 27 до 83 мВ и близкими средними значениями в пределах 58,4...67,0 мВ (табл. 1). Значения ТЭДС характеризуются равномерным распределением в каждом изученном кристалле ( $V=12,2...17,3\%$ ).

**Таблица 1.** Статистические параметры распределения ТЭДС пиритов западного фланга Сухоложского рудного поля

**Table 1.** Statistical parameters of distribution of the pyroelectric pyrites of the western flank of the Sukholozhsky ore field

№ образца Sample no.	Количество замеров Number of measurements	ТЭДС, мВ Thermal EMF, mV			Стандартное отклонение Standard deviation (S)	Коэффициент вариации Coefficient of variation (V), %
		min	max	$\bar{x}$		
3-4	47	33	80	59,6	9,7	16,3
3-5	38	40	78	66,9	8,7	12,2
3-6	42	27	83	67,0	12,5	18,7
3-7	50	35	77	58,4	11,2	17,3
3-8	39	31	75	62,5	10,1	15,3

В трех полированных шлифах кристаллов пирита (образцы 3-1, 3-2, 3-3) проведено определение содержаний химических элементов и геохимическое картирование их поверхностей. Средний химический состав кристаллов пирита (табл. 2) несколько отличается от стехиометрической формулы пирита: S – 53,45 %, Fe – 46,54 %. Это, прежде всего, связано с наличием свободных катионных или анионных связей в пирите и изоморфным



**Рис. 2.** Фотографии: слева – кристалл пирита в филлите; справа – полированный шлиф кристалла пирита (образец 3-1). Числа в углах квадрата (фото справа) – номера точек измерения содержания химических элементов

**Fig. 2.** Photos: on the left – pyrite crystal in phyllite; on the right – a polished section of a pyrite crystal (sample 3-1). Numbers in the corners of the square (photo on the right) – the number of measurement points for the content of chemical elements

вхождением As и других элементов в матрицу кристаллов. В качестве элементов-примесей во всех кристаллах установлены: Co, Ni, Cu, Zn, As, Pb. Средние содержания элементов в образцах составляют десятки процентов для минералообразующих элементов и до десятых долей процентов – для микроэлементов. Наибольшими изменениями характеризуются содержания Cu – от 0,04 до 0,21 % и Pb – от 0,06 до 0,18 %. Также в образце 3-1 установлены единичные содержания Ti, достигающие 0,87 %. Содержание золота в трех кристаллах пирита по результатам атомно-абсорбционного анализа (аналитик А.Н. Кряжов) составило, г/т: 3-4 – 0,06; 3-5 – 0,099; 3-6 – 0,152.

**Таблица 2.** Средние содержания химических элементов в пиритах по результатам рентгеноспектрального анализа, %

**Table 2.** Average content of chemical elements in pyrites based on X-ray spectral analysis, %

№ образца Sample no.	Кол-во замеров Number of measurements	S	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Pb
3-1	128	51,77	46,72	0,04	0,13	0,21	0,05	0,25	0,08
3-2	25	52,89	46,25	0,03	0,06	0,04	0,04	0,57	0,06
3-3	21	52,42	46,80	0,07	0,06	0,18	0,05	0,31	0,18

В полированных шлифах кристаллов пирита изучены схемы распределения элементов-примесей.

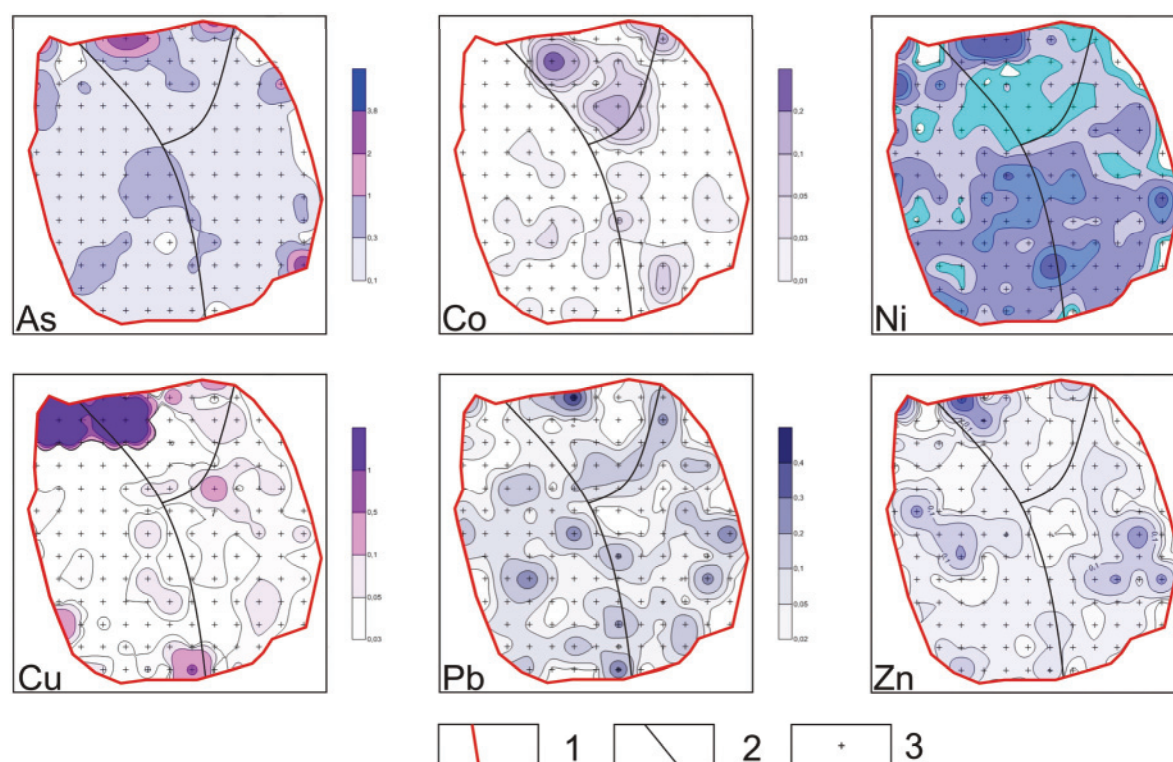
Содержания минералообразующих элементов – S и Fe – в пирите распределены равномерно по всей площади кристалла. Равномерное распределение As в плоскости кристаллов может свидетельствовать о формировании кристаллов в процессе гидротермально-метасоматического рудообразования. Аномально высокие концентрации элементов-примесей (Ni, Cu, Zn, Pb, As и др.) в отдельных точках опробования плоскостей кристаллов, очевидно, обусловлены присутствием механических примесей пирротина, халькопирита, сфалерита, галенита, арсенопирита. Также в качестве механической примеси в кристаллах пирита установлен силикат тория – торит ( $\text{ThSiO}_4$ ).

### Обсуждение

Изученные кристаллы пирита имеют только кубический габитус, что характерно для пиритов верхних частей рудных тел.

Наличие дырочного типа проводимости пирита и повышенное содержание в них Cu, Pb, Zn, As также свидетельствует о верхнерудном уровне эрозионного среза западного фланга Сухоложского рудного поля [16, 17, 20].

Таким образом, анализ кристалломорфологии и ТЭДС пирита позволяет сделать вывод о неболь-



**Рис. 3.** Схемы распределения концентраций элементов-примесей в кристалле пирита (3-1) по результатам рентгеноспектрального анализа, %: 1 – контур кристалла; 2 – трещины в кристалле; 3 – точки определения содержания химических элементов

**Fig. 3.** Schemes of distribution of impurity elements concentrations in a pyrite crystal (3-1) based on the results of X-ray spectral analysis, %: 1 is the contour of the crystal; 2 are the cracks in the crystal; 3 are the points for determining the content of chemical elements



шом (верхнерудном) уровне эрозионного среза золотого оруденения. Об этом также свидетельствует наличие в центральной и восточной частях Сухоложского рудного поля основных запасов золота, локализованных в горизонтах хомолхинской свиты, расположенных стратиграфически ниже по разрезу.

Элементы-примеси, установленные в кристаллах пирита по результатам рентгеноспектрального анализа, аналогичны элементному составу пород и руд месторождения Сухой Лог (по результатам ICP-MS анализа) [21]. Исключение составляет лишь Ag, не обнаруженное в силу низкой чувствительности анализа. Таким образом, наличие характерных элементов-примесей в пиритах и, прежде всего, As, распределенного равномерно в плоскости детально изученного полированного шлифа, свидетельствует о формировании кристаллов в процессе гидротермально-метасоматического рудообразования.

На примере детально изученных полированных шлифов крупнокристаллического пирита показана возможность геохимического картирования рудных минералов (выявление зон роста кристаллов или их отсутствия, поступление более поздних растворов по трещинам), что может существенно помочь при решении вопросов, связанных с определением стадийности минералообразования, а также последовательности образования минеральных комплексов. Решение данных вопросов возможно путем систематического отбора и изучения проб пирита из рудных тел месторождений, различных горизонтов, парагенетических ассоциаций, метасоматических зон, по простирацию рудных тел.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юшкин Н.П. Топоминаралоги́я. – М.: Недра, 1982. – 288 с.
2. Литошко Д.Н. Топоминаралоги́я медно-молибденовой рудной формации Полярного Урала. – Л.: Наука, 1988. – 212 с.
3. Пшеничкин А.Я. Использование кристалломорфологии пирита при минералогическом картировании золоторудных месторождений Алтае-Саянской складчатой области // Минералогическое картирование рудоносных территорий. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. – С. 60–71.
4. Savage K.S., Stefan D., Lehner S.W. Impurities and heterogeneity in pyrite: Influences on electrical properties and oxidation products // *Applied Geochemistry*. – 2008. – V. 23. – № 2. – P. 103–120.
5. Agangi A., Hofmann A., Przybyłowicz W. Trace element zoning of sulfides and quartz at sheba and fairview gold mines: Clues to mesoarchean mineralisation in the barberton greenstone belt, South Africa // *Ore Geology Reviews*. – 2014. – V. 56. – P. 94–114.
6. Agangi A., Hofmann A., Wohlgemuth-Ueberwasser C.C. Pyrite zoning as a record of mineralization in the ventersdorp contact reef, Witwatersrand Basin, South Africa // *Economic Geology*. – 2013. – V. 108. – № 6. – P. 1243–1272.
7. Trace-element characteristics of different pyrite types in Mesoproterozoic to Palaeoproterozoic placer deposits / N. Koglin, H.E. Frimmel, W.E.L. Minter, H. Brätz // *Mineralium Deposita*. – 2010. – V. 45. – № 3. – P. 259–280.

#### Выводы

1. Химический состав крупных кристаллов пирита отличается от их стехиометрической формулы, что обусловлено наличием в их составе элементов-примесей, входящих в структуру минерала в виде механических и изоморфных примесей. Рентгеноспектральным анализом установлен перечень элементов, постоянно присутствующих в пирите: Co, Ni, Cu, Zn, As, Pb.
2. Содержание S и Fe, в детально изученных кристаллах пирита, распределено равномерно. Наличие в кристаллах относительно равномерно распределенного As свидетельствует о его синрудном образовании в процессе гидротермально-метасоматического рудообразования и его, возможно, изоморфном вхождении в структуру минерала.
3. Наличие на западном фланге Сухоложского рудного поля кристаллов пирита кубического габитуса со слабо развитой гранью {210}, а также дырочный тип их проводимости свидетельствуют о верхнерудном уровне среза золотого оруденения.
4. Для получения более представительной информации о характере распределения изученных параметров кристаллов пирита в крупнообъемном метасоматическом ореоле необходимо проведение дополнительных исследований с обработкой существенно большего количества анализируемого материала.
5. Примененная методика комплексного изучения кристаллов пирита может быть использована при проведении прогнозно-поисковых работ на золотое оруденение в других регионах.
8. Chouinard A., Paquette J., Williams-Jones A.E. Crystallographic controls on trace-element incorporation in Auriferous pyrite from the Pascua epithermal high-sulfidation deposit, Chile-Argentina // *Canadian Mineralogist*. – 2005. – V. 43. – № 3. – P. 951–963.
9. Implications of pyrite geochemistry for gold mineralisation and remobilisation in the Jiaodong gold district, northeast China / S.E. Mills, A.G. Tomkins, R.F. Weinberg, H.-R. Fan // *Ore Geology Reviews*. – 2015. – V. 71. – P. 150–168.
10. Ye T., Li N. The application of pyrite LA-ICP-MS trace element analysis to gold deposits // *Scientia Geologica Sinica*. – 2015. – V. 50. – № 4. – P. 1178–1199.
11. Texture and chemistry of pyrite at Chah Zard epithermal gold-silver deposit, Iran / H. Kouhestani, M. Ghaderi, R.R. Large, K. Zaw // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – V. 85. – P. 80–101.
12. Ocean and atmosphere geochemical proxies derived from trace elements in marine pyrite: Implications for ore genesis in sedimentary basins / R.R. Large, I. Mukherjee, D.D. Gregory, J.A. Steadman, V.V. Maslennikov, S. Meffre // *Economic Geology*. – 2017. – V. 112. – № 2. – P. 423–450.
13. Textures and trace element composition of pyrite from the Bukit Botol volcanic-hosted massive sulphide deposit, Peninsular Malaysia / M.B.I. Basori, S. Gilbert, R.R. Large, K. Zaw // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2018. – V. 158. – P. 173–185.
14. Morishita Y., Shimada N., Shimada K. Invisible gold in arsenian pyrite from the high-grade Hishikari gold deposit, Japan: Signi-

- fiance of variation and distribution of Au/As ratios in pyrite // *Ore Geology Reviews*. – 2018. – V. 95. – P. 79–93.
15. Results of LA-ICP-MS sulfide mapping from Algoma-type BIF gold systems with implications for the nature of mineralizing fluids, metal sources, and deposit models / B. Gourcerol, D.J. Kontak, P.C. Thurston, J.A. Petrus // *Mineralium Deposita*. – 2018. – V. 53. – № 5. – P. 1–24.
  16. Пшеничкин А.Я., Коробейников А.Ф., Мацюшевский А.В. Особенности кристалломорфологии и термо-эдс пиритов золоторудных месторождений различных типов // *Известия Томского политехнического института*. – 1976. – Т. 260. – С. 39–48.
  17. Пшеничкин А.Я. Кристалломорфология пирита и ее использование в практике поисково-разведочных работ на золото // *Геология и геофизика*. – 1989. – № 11. – С. 65–75.
  18. Gold in Pyrite within Altai-Sayan Folded Belt Gold Deposits / A.Y. Pshenichkin, Y.A. Oskina, O.V. Savinova, T.F. Dolgaya // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2014. – V. 21. – P. 1–4. DOI: 10.1088/1755-1315/21/1/012005.
  19. Коробейников А.Ф., Пшеничкин А.Я. Геохимические особенности пиритов золоторудных месторождений // *Геохимия*. – 1985. – № 1. – С. 93–104.
  20. Пириты золоторудных месторождений (свойства, зональность, практическое значение) / А.Ф. Коробейников, В.А. Нарсеев, А.Я. Пшеничкин, П.С. Ревакин. – М.: ЦНИГРИ, 1993. – 213 с.
  21. Гаврилов А.М., Кряжев С.Г. Минералого-геохимические особенности руд месторождения Сухой Лог // *Разведка и охрана недр*. – 2008. – № 8. – С. 3–16.
  22. Шер С.Д. Околорудные изменения, сопутствующие золото-кварцевым жилам в Ленском золотоносном районе // *Метасоматические изменения боковых пород и их роль в рудообразовании* / под ред. Н.И. Наковника. – М.: Недра, 1966. – С. 282–291.
  23. Буряк В.А. *Метаморфизм и рудообразование*. – М.: Недра, 1982. – 256 с.
  24. Буряк В.А., Хмелевская Н.М. Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). – Владивосток: Дальнаука, 1997. – 156 с.
  25. Дистлер В.В., Митрофанов Г.Л., Немеров В.К. Формы нахождения металлов платиновой группы и их генезис в золоторудном месторождении Сухой Лог (Россия) // *Геология рудных месторождений*. – 1995. – Т. 38. – № 6. – С. 467–484.
  26. Новые данные об условиях рудоотложения и составе рудообразующих флюидов золото-платинового месторождения Сухой Лог / Н.П. Лаверов, В.Ю. Прокофьев, В.В. Дистлер, М.А. Юдовская, А.М. Спиридонов, В.И. Гребенщикова, Д.А. Куликов // *Доклады РАН*. – 2000. – Т. 371. – № 1. – С. 88–92.
  27. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the Giant Sukhoi Log deposit, Lena Gold Province, Russia / R.R. Large, L.V. Danyushevsky, Z. Chang, V.V. Maslennikov, F. Robert // *Economic Geology*. – 2007. – V. 102. – № 7. – P. 1233–1267.
  28. Paragenetic relationships between pyrite, carbon, and gold at the Sukhoi Log deposit and typomorphism of the pyrite surface / V.L. Tauson, V.K. Nemerov, E.A. Razvozhzaeva, A.M. Spiridonov, S.V. Lipko, A.E. Budyak // *Doklady Earth Sciences*. – 2009. – V. 426. – № 1. – P. 690–694.
  29. Иванов А.И. Основные черты геологического строения и золотоносность Бодайбинского рудного района // *Руды и металлы*. – 2008. – № 3. – С. 43–61.
  30. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе / В.Л. Русинов, О.В. Русинова, С.Г. Кряжев Ю.В. Щегольков, Э.И. Альшева, С.Е. Борисовский // *Геология рудных месторождений*. – 2008. – Т. 50. – № 1. – С. 3–46.
  31. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов / М.А. Юдовская, В.В. Дистлер, Н.В. Родионов, А.В. Мохов, А.В. Антонов, С.А. Сергеев // *Геология рудных месторождений*. – 2011. – Т. 53. – № 1. – С. 32–64.
  32. Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в золоторудном месторождении Сухой Лог (Ленский район). Ч. 2. Петрология околорудного метасоматизма / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верховин // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 28–37.
  33. Гаврилов Р.Ю. Геохимическая зональность рудомещающего ореола мезотермального золоторудного месторождения Западное (Ленский рудный район) // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. – 2014. – № 1. – С. 59–67.

Поступила 06.04.2018 г.

#### Информация об авторах

**Пшеничкин А.Я.**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геологии золота отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Гаврилов Р.Ю.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDK 553.411:549.324.31

## PYRITES OF WEST FLANK OF SUKHOLOZHSKOE GOLD ORE FIELD (LENSK ORE DISTRICT)

Anatoliy Ya. Pshenichkin<sup>1</sup>,  
paya@tpu.ru

Roman Yu. Gavrillov<sup>1</sup>,  
GavrillovRY@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to introduce new complex methods for predicting gold ore objects into the practice of geological exploration.

**The aim** of the research is to obtain information on crystal morphology, thermo-emf, chemical composition and impurity elements of pyrite from the ore zone of the western flank of the Sukholozhsky ore field.

**Methods:** crystal morphology, thermal electromotive force, X-ray spectral analysis, statistical processing of geochemical data on samples of pyrite crystals taken from the ore zone of the western flank of the Sukholozhsky ore field.

**Results.** It was determined that the studied pyrite crystals are found most often in the form of cubes. Often on crystals there is a poorly developed face {210}. Pyrite is characterized exclusively by a hole type conductivity with a spread of thermal electromotive force values from 27 to 83 mV and close average values within the range of 58,4...67,0 mV. The chemical composition of pyrite crystals differs from their stoichiometric formula, which indicates the occurrence of isomorphic impurities (As) in the mineral structure. X-ray spectral analysis revealed the elements that are constantly present in pyrite: Co, Ni, Cu, Zn, As, Pb. The presence of impurity elements in pyrites, typical for the ores of the Sukhoy Log deposit, and especially As, indicates pyrite synore formation during hydrothermal-metasomatic process and its possible entry in the form of isomorphic impurities into mineral structure. Pyrrhotite, chalcopyrite, sphalerite, galena, arsenopyrite, thorianite are defined as mechanical impurities in pyrite. Based on the study of crystal morphology, thermal electromotive force, chemical composition of pyrites, and distribution of impurity elements in them, a conclusion was made on the upper ore level of the ore zone erosional section in the western flank of the Sukholozhsky ore field.

**Key words:**

Gold mineralization, pyrite, crystal morphology, thermal electromotive force, chemical composition, impurity elements.

## REFERENCES

1. Yushkin N.P. *Topomineralogiya* [Topomineralogy]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 288 p.
2. Litoshko D.N. *Topomineralogiya medno-molibdenovoy rudnoy formatsii Polyarnogo Urala* [Topomineralogy of a copper-molybdenum ore formation of Polar Ural Mountains]. Leningrad, Nauka Publ., 1988. 212 p.
3. Pshenichkin A. Ya. Ispolzovanie kristallomorfologii piritov pri mineralogicheskoy kartirovaniy zolotorudnykh mestorozhdeniy Altai-Sayanskoy skladchatoy oblasti [Use of crystal morphology of pyrite in mineralogical mapping of gold deposits of the Altai-Sayan folded region]. *Mineralogicheskoe kartirovanie rudonosnykh territoriy* [Mineralogical mapping of ore-bearing territories]. Sverdlovsk, UNSC of the USSR Academy of Sciences Publ., 1985. pp. 60–71.
4. Savage K.S., Stefan D., Lehner S.W. Impurities and heterogeneity in pyrite: Influences on electrical properties and oxidation products. *Applied Geochemistry*, 2008, vol. 23, no. 2, pp. 103–120.
5. Agangi A., Hofmann A., Przybylowicz W. Trace element zoning of sulfides and quartz at sheba and fairview gold mines: Clues to mesoarchean mineralisation in the barberton greenstone belt, South Africa. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 56, pp. 94–114.
6. Agangi A., Hofmann A., Wohlgemuth-Ueberwasser C.C. Pyrite zoning as a record of mineralization in the ventersdorp contact reef, Witwatersrand Basin, South Africa. *Economic Geology*, 2013, vol. 108, no. 6, pp. 1243–1272.
7. Koglin N., Frimmel H.E., Minter W.E.L., Brätz H. Trace-element characteristics of different pyrite types in Mesoarchean to Palaeoproterozoic placer deposits. *Mineralium Deposita*, 2010, vol. 45, no. 3, pp. 259–280.
8. Chouinard A., Paquette J., Williams-Jones A.E. Crystallographic controls on trace-element incorporation in Auriferous pyrite from the Pascua epithermal high-sulfidation deposit, Chile-Argentina. *Canadian Mineralogist*, 2005, vol. 43, no. 3, pp. 951–963.
9. Mills S.E., Tomkins A.G., Weinberg R.F., Fan H.-R. Implications of pyrite geochemistry for gold mineralisation and remobilisation in the Jiaodong gold district, northeast China. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 71, pp. 150–168.
10. Ye T., Li N. The application of pyrite LA-ICP-MS trace element analysis to gold deposits. *Scientia Geologica Sinica*, 2015, vol. 50, no. 4, pp. 1178–1199.
11. Kouhestani H., Ghaderi M., Large R.R., Zaw K. Texture and chemistry of pyrite at Chah Zard epithermal gold-silver deposit, Iran. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 85, pp. 80–101.
12. Large R.R., Mukherjee I., Gregory D.D., Steadman J.A., Maslennikov V.V., Meffre S. Ocean and atmosphere geochemical proxies derived from trace elements in marine pyrite: Implications for ore genesis in sedimentary basins. *Economic Geology*, 2017, vol. 112, no. 2, pp. 423–450.
13. Basori M.B.I., Gilbert S., Large R.R., Zaw K. Textures and trace element composition of pyrite from the Bukit Botol volcanic-hosted massive sulphide deposit, Peninsular Malaysia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, vol. 158, pp. 173–185.
14. 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 Geology Reviews*, 2018, vol. 95, pp. 79–93.
15. Gourcerol B., Kontak D.J., Thurston P.C., Petrus J.A. Results of LA-ICP-MS sulfide mapping from Algoma-type BIF gold systems with implications for the nature of mineralizing fluids, metal sources, and deposit models. *Mineralium Deposita*, 2018, vol. 53, no. 5, pp. 1–24.
16. Pshenichkin A.Ya., Korobeynikov A.F., Matsyushevsky A.V. Osobennosti kristallomorfologii i termo-eds piritov zolotorudnykh mestorozhdeniy razlichnykh tipov [Features of a kristallo-



- morfology and thermos-EMF of pyrites of gold fields of various types]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1976, vol. 260, pp. 39–48.
17. Pshenichkin A.Ya. Pyrite crystal morphology and its use in the practice of exploration for gold. *Russian Geology and Geophysics*, 1989, no. 11, pp. 65–75. In Rus.
  18. Pshenichkin A., Oskina Y., Savinova O., Dolgaya T. Gold in Pyrite within Altai-Sayan Folded Belt Gold Deposits. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Tomsk; Russian Federation; 7–11 April 2014. Vol. 21. DOI: 10.1088/1755-1315/21/1/012005
  19. Korobeynikov A.F., Pshenichkin A.Ya. Geochemical features of pyrite of gold deposits. *Geochemistry*, 1985, no. 1, pp. 93–104. In Rus.
  20. Korobeynikov A.F., Narseev V.A., Pshenichkin A.Ya., Revyakin P.S. *Pirity zolotorudnykh mestorozhdeniy (svoystva, zonalnost, prakticheskoe znachenie)* [Pyrites of gold fields (properties, zonality, practical value)]. Moscow, CNIGRI Publ., 1993. 213 p.
  21. Gavrilov A.M., Kryazhev S.G. Ore mineral-geochemical features of Sukhoy Log deposit. *Razvedka i okhrana nedr*, 2008, no. 8, pp. 3–16. In Rus.
  22. Sher S.D. Okolorudnye izmeneniya, sopotstvuyushchie zolotokvartsevym zhilam v Lenskom zolotonosnom rayone [Wallrock alteration, associating gold-quartz veins in Lena gold district]. *Metasomaticheskie izmeneniya bokovykh porod i ikh rol v rudoobrazovanii* [Metasomatic changes of wall rocks and their part in ore formation]. Ed. by N.I. Nakovnik. Moscow, Nedra Publ., 1966. pp. 282–291.
  23. Buryak V.A. *Metamorfizm i rudoobrazovanie* [Metamorphism and ore formation]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 256 p.
  24. Buryak V.A., Khmelevskaya N.M. *Sukhoy Log – odno iz krupnykh zolotorudnykh mestorozhdeniy mira (genezis, zakonomernosti razmeshcheniya orudneniya, kriterii prognozirovaniya)* [The Sukhoy Log – one of the largest gold fields in the world (genesis, regularities of mineralization placement, criteria of forecasting)]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 1997. 156 p.
  25. Distler V.V., Mitrofanov G.L., Nemerov V.K. *Formy nakhozhdeniya metallov platinovoy gruppy i ikh genezis v zolotorudnom mestorozhdenii Sukhoy Log (Rossiya)* [Occurrence forms of platinum group metals and their genesis in the gold field Sukhoy Log (Russia)]. *Geology of the ore deposit*, 1995, vol. 38, no. 6, pp. 467–484.
  26. Laverov N.P., Prokofev V.Yu., Distler V.V., Yudovskaya M.A., Spiridonov A.M., Grebenshchikova V.I., Kulikov D.A. Novye dannye ob usloviyakh rudootlozheniya i sostave rudoobrazuyushchikh flyuidov zoloto-platinovogo mestorozhdeniya Sukhoy Log [Up-to-date information on ore deposition condition and ore-forming fluid composition of gold-platinum deposit Sukhoy Log]. *Doklady RAN*, 2000, vol. 371, no. 1, pp. 88–92.
  27. Large R.R., Danyushevsky L.V., Chang Z., Maslennikov V.V., Robert F. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the Giant Sukhoi Log deposit, Lena Gold Province, Russia. *Economic Geology*, 2007, vol. 102, no. 7, pp. 1233–1267.
  28. Tauson V.L., Nemerov V.K., Razvozhayeva E.A., Spiridonov A.M., Lipko S.V., Budyak A.E. Paragenetic relationships between pyrite, carbon, and gold at the Sukhoi Log deposit and typomorphism of the pyrite surface. *Doklady Earth Sciences*, 2009, vol. 426, no. 1, pp. 690–694.
  29. Ivanov A.I. Osnovnye cherty geologicheskogo stroeniya i zolotonosnost Bodaybinskogo rudnogo rayona [Main lines of a geological structure and gold content of the Bodaybinsky ore area]. *Rudy i metally*, 2008, no. 3, pp. 43–61.
  30. Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., Shhegolkov Yu.V., Alysheva E.I., Borisovskiy S.E. Wall-rock metasomatism of carbonaceous terrigenous rocks in the Lena gold district. *Geology of the ore deposit*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 3–46. In Rus.
  31. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V., Mokhov A.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. Ratio of metamorphism and ore formation on a gold black-shale deposit Sukhoy Log according to U-Th-Pb-isotope SHRIMP dating of accessory minerals. *Geology of the ore deposit*, 2011, vol. 53, no. 1, pp. 32–64. In Rus.
  32. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhovzin A.V. Petrology-geochemical features of wall-rock metasomatism in gold deposit Sukhoy Log (Lena district). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 28–37. In Rus.
  33. Gavrilov R.Yu. Geochemical zonality of an ore-hosting halo of a mesothermal gold field Zapadnoe (Lensky ore area). *Geologiya i mineralno-syrevye resursy Sibiri*, 2014, no. 1, pp. 59–67. In Rus.

Received: 6 April 2018.

#### Information about the authors

**Anatoliy Ya. Pshenichkin**, Cand. Sc., head of the laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Roman Yu. Gavrilov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.