

Методика изучения керна объектов золото-кварцевой формации с применением рентгеновской компьютерной томографии на примере месторождения Дразное (Республика Саха (Якутия))

X-ray computed tomography study for drill core of the Drazhnoe orogenic-type gold deposit (Sakha (Yakutia), Russian Federation)

Чикатуева В. Ю., Степанов Н. В.,
Читалин А. Ф., Корост Д. В.

Chikatueva V. Yu., Stepanov N. V.,
Chitalin A. F., Korost D. V.

Месторождения золото-кварцевой формации имеют отчётливый структурный контроль и сопровождаются околорудным метасоматическим ореолом. Однако при детальном моделировании часто не совпадают структурные планы распространения богатых рудонасыщенных участков и зон метасоматитов; последние не всегда приурочены к разрывным нарушениям. Поэтому очень важно ещё на ранних этапах изучения месторождения надёжно определить характер распределения рудных зон, так как от этого зависит корректная постановка буровой программы и экономическая оценка объекта. Поставленную задачу можно решить методом рентгеновской компьютерной томографии (КТ) при изучении керна.

В работе представлена методология изучения полноразмерных образцов кернового материала золото-рудных месторождений с применением КТ. Объект исследования – образец керна, характеризующий центральную часть рудного тела месторождения Дразное (Тарыньское рудное поле, Республика Саха (Якутия)). КТ-сканирование образца проводилось на двух энергиях (80 и 130 кэВ) в томографе SIEMENS Somatom Perspective. Была получена детальная трёхмерная стереологическая модель керна, что позволило изучить распределение рудных минералов в объёме образца, выделить разновозрастные жильно-прожилковые тела, исследовать их морфологию и закономерности распределения в них рудной минерализации. В итоге предложена предварительная интерпретация структурных обстановок формирования рудной минерализации и прожилков.

Ключевые слова: рентгеновская компьютерная томография, штокверк, золото, месторождение Дразное.

Orogenic gold-quartz deposits have a clear structural control and are accompanied by wallrock metasomatic alteration. However, in detailed modeling of such deposits, there is often a mismatch between the structural plans for high-grade ore zone distribution and metasommatite zones, and the latter are not always associated with faults. This is explained by the evolution of the hydrothermal process and the pulsating nature of the development of the territory. In the early stages of the mineral deposit study, it is very important to reliably determine the distribution of ore zones, since the correct targeting of the drilling program and the economic deposit assessment depend on it. The problem can be solved using the method of X-ray computed tomography (CT) in the core study.

This paper presents the methodology of studying full-size core samples of gold deposits by using CT. A core sample characterizing the central part of ore body of Drazhnoye deposit (Tarynskoye ore field, Republic of Sakha (Yakutia)) was used as the study material. The sample studied was scanned by a SIEMENS Somatom Perspective tomograph at two energies (80 and 130 keV). As a result, a detailed three-dimensional stereological model of the core was obtained, which made it possible not only to study the distribution of ore minerals in the volume of the entire sample, but also to identify vein bodies of different ages, as well as to study their morphology and trace the distribution patterns of ore mineralization in them. Based on the study results, we can offer a preliminary interpretation of ore mineralization and vein formation sequence.

Keywords: computed X-ray tomography, stockwork, gold, Drazhnoye.

Для цитирования: Чикатуева В. Ю., Степанов Н. В., Читалин А. Ф., Корост Д. В. Методика изучения керна объектов золото-кварцевой формации с применением рентгеновской компьютерной томографии на примере месторождения Дразное (Республика Саха (Якутия)). Руды и металлы. 2021. № 4. С. 43–59. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10027.

For citation: Chikatueva V. Yu., Stepanov N. V., Chitalin A. F., Korost D. V. X-ray computed tomography study for drill core of the Drazhnoe orogenic-type gold deposit (Sakha (Yakutia), Russian Federation). Ores and metals, 2021, № 4, pp. 43–59. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10027.

Введение. Цифровые методы исследования стали неотъемлемой частью любых поисковых и геологоразведочных работ. В последние годы во всём мире набирает популярность метод рентгеновской компьютерной томографии (КТ), который в России часто связывают с технологией «Цифрового керна» [6]. Данный метод уже успешно применяется в нефтяной отрасли, активно используется при изучении морфологии и форм выделения минеральных индивидов сульфидной минерализации, благородных металлов, а также при изучении их пространственного распределения и взаимоотношения между ними [9, 11, 12]. Главная задача КТ – получить информацию о стереологическом строении объекта исследования, не нарушая его целостности, что даёт преимущество перед классическими методами исследования.

При поисках и разведке рудных месторождений важно ещё на ранних этапах изучения надёжно определить характер распределения рудных минералов и пространственные взаимоотношения как друг с другом, так и с геологической структурой месторождения в целом. Это имеет большое значение, поскольку от достоверности получаемых геологических данных и правильной геометризации рудных жил и прожилков зависят выбор параметров буровой разведочной сети и полнота оценки запасов месторождения. Одним из эффективных инструментов в решении такой задачи является КТ-сканирование полноразмерного керна, по результатам которого геологи могут изучать объёмную цифровую (стереологическую) модель образца, отражающую его структурно-минералогические особенности.

Главная цель данной работы – демонстрация методологии получения и изучения детальной цифровой модели керна с использованием рентгеновской компьютерной томографии.

Материалы и методы исследования. Материалом для исследования послужил образец керна, отобранный во время полевых работ на месторождении Дрожное (Республика Саха (Якутия)) золото-кварцевой формации (рис. 1)

[1, 5]. Изучаемая методом КТ половинка керна представлена тонкопереслаивающимися песчаниками и алевропесчаниками, пересечёнными прожилками кварцевого и кварц-карбонатного составов нескольких генераций, мощности и ориентировки. Видимая рудная минерализация в образце представлена пиритом и арсенопиритом; самостоятельных выделений золота не наблюдалось. Диаметр керна составляет 63,5 мм (НҚ). По результатам секционного пробирного анализа половинки керна (секция – 1 м) содержание золота в интервале отбора образца составляет 8,82 г/т. Предварительная подготовка образца для КТ-съёмки не требуется.

Прозрачно-полированные шлифы изучены в лаборатории рудной микроскопии кафедры геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых МГУ им. М. В. Ломоносова. Использованы микроскопы Axioscop 40A-Pol (Carl Zeiss) и Полам Р-312. Уточнение составов и определение микропримесей в минералах проведено при помощи электронно-зондовых исследований, выполненных на кафедре петрологии МГУ им. М. В. Ломоносова на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6480LV с вольфрамовым термоэмиссионным катодом, оснащённым энергодисперсионным спектрометром INCA X-Maxn (площадь активной зоны кристалла 50 мм², сверхтонкое окно АТW-2) с разрешением 124 эВ (Mn K α , 20 kV).

Основы и технология КТ-съёмки. Технология КТ-съёмки основана на взаимодействии рентгеновского излучения с веществом. Большинство рентгеновских томографов имеют конусно-лучевую конфигурацию, в которой рентгеновский луч исходит из источника излучения и попадает на детектор рентгеновских лучей [2, 7, 11]. Объект исследования устанавливается между источником излучения и детектором, фиксирующим уровень поглощённого излучения. Получаемое на детекторе двумерное изображение, характеризующее интенсивность рентгеновского излучения после его прохождения через исследуемый объект, называется теневой проекцией. В процессе съёмки в зависимости от технических особенностей

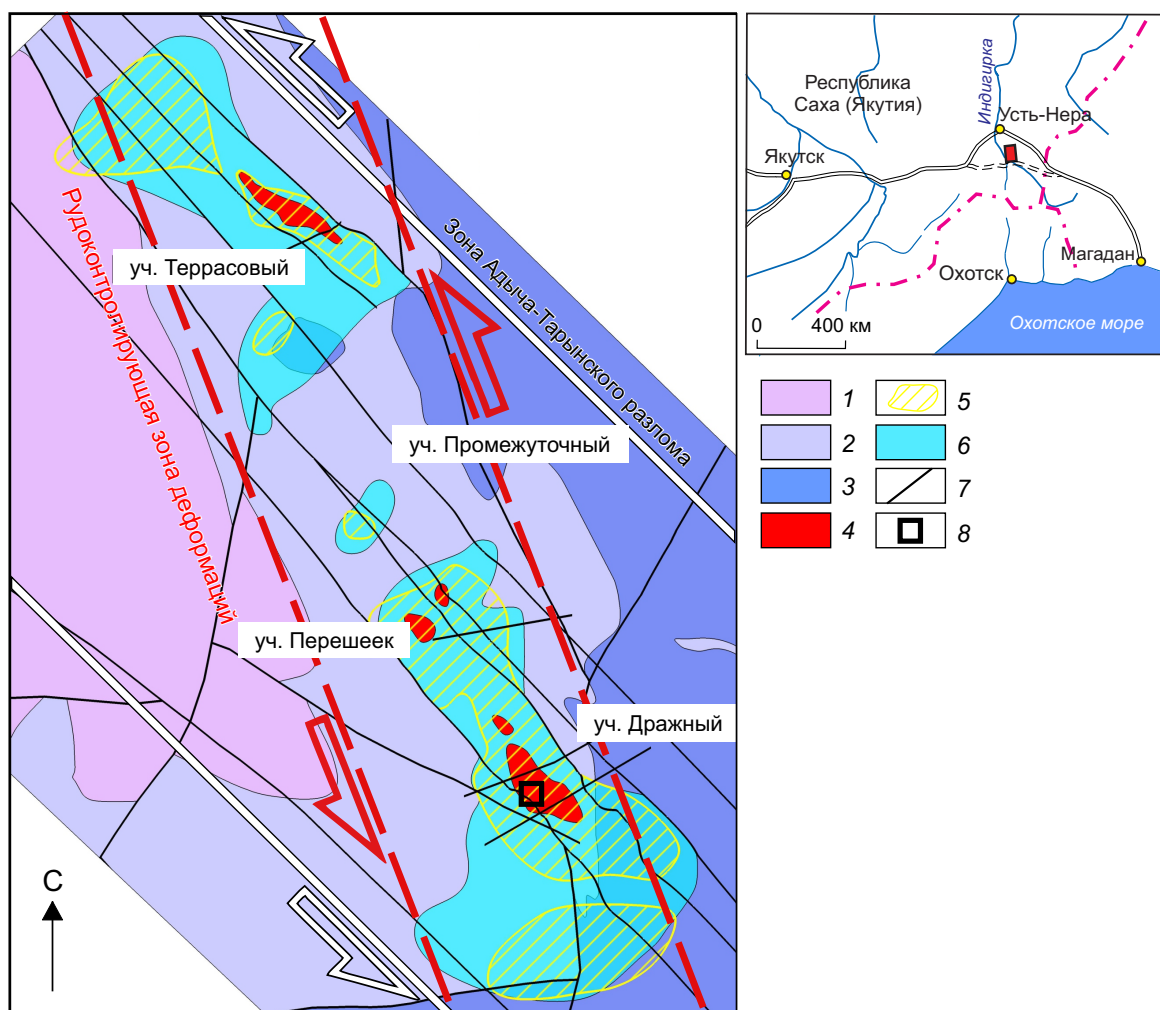


Рис. 1. Схематическая структурно-геологическая карта месторождения Дразное:

1 – Т₃, верхняя толща (алевролиты с прослоями песчаников); 2 – Т₃, нижняя толща (алевролиты, редкие прослои гравелитов); 3 – переслаивание песчаников и алевролитов; 4 – рудные тела; 5 – зоны пиритизации; 6 – кварцевый штокверк; 7 – разрывные нарушения; 8 – расположение участка Дразный

Fig.1. Sketch structural and geological map of the Drazhnoye deposit:

1 – Т₃, upper strata (sandstone-banded siltstones); 2 – Т₃, lower strata (siltstones, rare interbeds of gravelstones); 3 – interbedding of sandstones and siltstones; 4 – orebodies; 5 – pyritization zones; 6 – quartz stockwork; 7 – faults; 8 – ore-controlling deformation zone

томографа, производится вращение либо самого объекта исследования вокруг своей оси, либо источника излучения, в результате чего формируется набор теневых проекций с различных углов обзора, с точной пространственной привязкой.

При использовании КТ для последующей корректной обработки получаемых данных важной является информация о процессах, протекающих в результате ослабления излучения. В случае с изучением геологических объектов применяются источники излучения

с разбросом энергии от 80 до 130 кэВ. В зависимости от энергии излучения преобладают различные механизмы, ослабляющие рентгеновское излучение при его прохождении через объект исследования. Так, при съёмке на низких энергиях (50–80 кэВ) преобладает фотоэлектрическое поглощение, при котором входящий рентгеновский фотон выбивает внутренний электрон, занимая внутреннюю оболочку атома, что приводит к переходу электрона с внешней оболочки на внутреннюю. Показатель поглощения среды при фотоэлектрическом поглощении будет пропорционален Z^{4-5} , где Z – атомное число поглощающего материала. При КТ-съёмке на высоких энергиях (> 100 кэВ) протекает явление комптоновского рассеяния, при котором рентгеновские фотоны взаимодействуют только с внешним электроном, передавая ему часть своей энергии и изменяя направление своего движения. Показатель поглощения среды при комптоновском рассеянии будет пропорционален Z [8]. В результате такой разницы эффектов съёмка на больших энергиях рентгеновского излучения (от 130–140 кэВ) несёт информацию в основном о плотности объекта, измерение на низкой энергии (80–90 кэВ и ниже) содержит информацию о Z_{eff}^* [2, 10].

За счёт эффектов рассеяния и поглощения рентгеновского сигнала (рентгеновской абсорбции) ослабление излучения на получаемых теневых проекциях проявляется в виде изменения яркости, которое, как правило, выражается в распределении оттенков серого. Часто объектам большей плотности соответствуют светлые оттенки серого, меньшей – тёмные.

После получения первичных данных (набора теневых проекций) осуществляется их реконструкция, заключающаяся в пересчёте набора полученных рентгенограмм в набор плотностных сечений, отображающих внутреннюю

* В качестве характеристики состава обычно используется параметр Z , представляющий средневзвешенное атомное число изучаемого объекта. В геологии изучают минералы, состоящие из нескольких химических элементов, тогда под Z принимается эффективный атомный номер (Z_{eff}).

структуру образца. В ходе процедуры реконструкции интенсивность излучения на исходных рентгенограммах переводится в КТ-плотность, разрешение которой зависит от компьютерной системы, выполняющей реконструкцию [2]. Большинство современных систем используют 16-битную шкалу, позволяющую градуировать КТ-плотность в диапазоне от 0 до 65 535.

На сегодняшний день для детального изучения минеральных индивидов съёмка геологических образцов в рудной геологии производится на одной энергии (высокой). Для получения детальной стереологической модели геологических объектов, как правило, осуществляется КТ-сканирование образцов на специализированных томографах с разрешением до 0,5 мкм (например, SkyScan-1172 компании Bruker microCT, Бельгия). Для этого выпиливаются образцы либо цилиндрической, либо кубической формы, диаметр (или диагональ) которых не превышает 2 см. Время высокодетального КТ-сканирования зависит от выбранного разрешения съёмки и варьирует от первых единиц до десятков часов. Съёмка полноразмерных образцов размером более 5 × 5 см часто имеет невысокое разрешение от 50 до 250 мкм и носит, скорее, «прицельный характер» в целях выбора наиболее представительных мест для дальнейшего изготовления небольших цилиндров или кубиков для КТ-сканирования с высоким разрешением, или изучения микрокомпонентов породы. В качестве примера ниже приведены результаты ранее выполненных исследований ядра методом рентгеновской компьютерной томографии (рис. 2).

Как видно из рис. 2, наиболее подробной объёмной геологической информацией обладает стереологическая модель, полученная при съёмке небольшого образца с разрешением 4,5 мкм. Тем не менее, при анализе структурно-минералогических особенностей рудных месторождений стереологические модели образцов, размер которых не превышает 2 × 2 см, не в полной мере представительны. Для объёмного изучения пространственных и возрастных взаимоотношений минеральных и

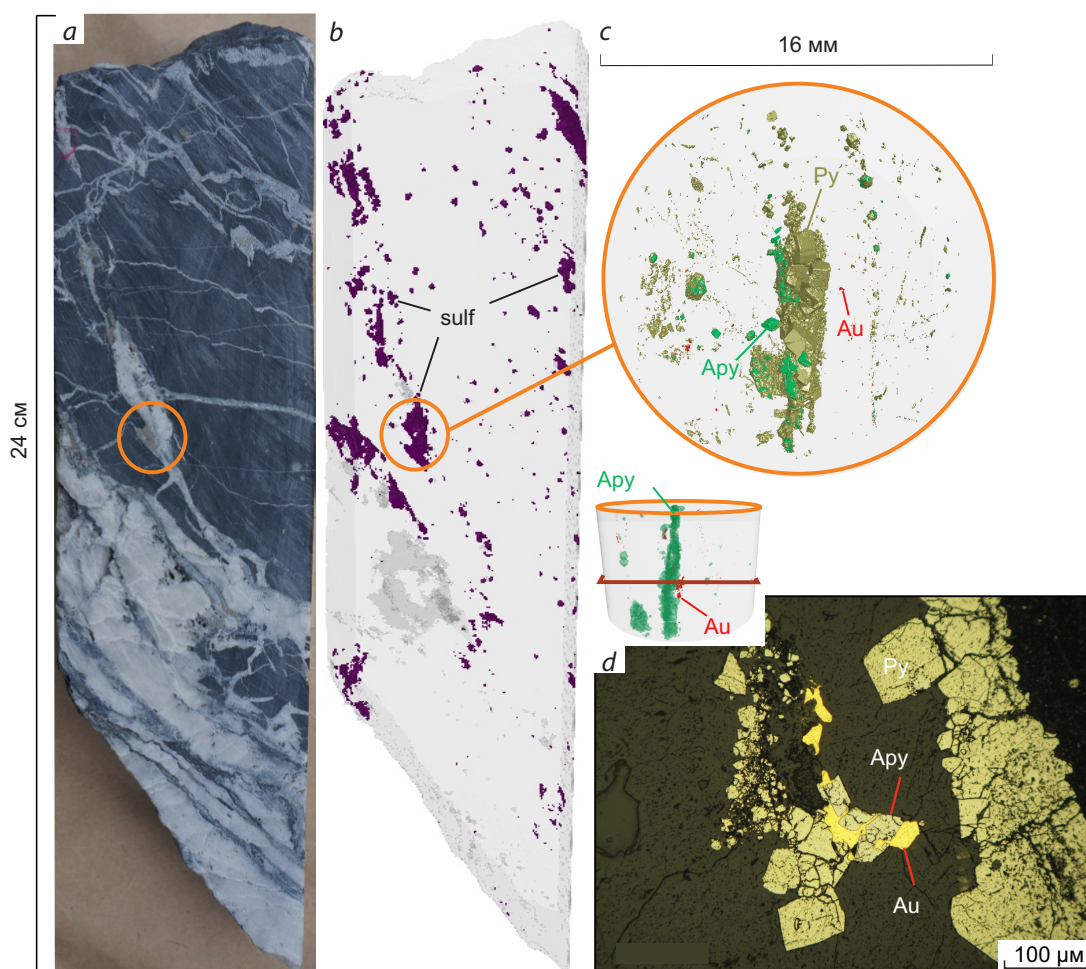


Рис. 2. Результаты изучения половинки керна методом рентгеновской компьютерной томографии [3, 5]:

a – фото образца, представленного алевропесчаниками с кварцевыми и кварц-карбонатными прожилками; *b* – изображение стереологической модели керна, полученное в результате сканирования керна с разрешением съёмки 100 μm : фиолетовый цвет – рудная минерализация (sulf), оранжевый кружок – место изготовления цилиндра для детальной КТ-съёмки, см. рис. 2, *c*; *c* – картина распределения зёрен арсенопирита и золота в цилиндре диаметром 16 мм, полученная в результате КТ-съёмки с разрешением 4,5 μm , красная линия – плоскость среза шлифа; *d* – фото рудных минералов под микроскопом в шлифе, указанном на рис. 2, *c* (Py – пирит, Apy – арсенопирит, Au – золото)

Fig. 2. Study results for core half by X-ray computed tomography [3, 5]:

a – photo of the sample represented by silt sandstone with quartz and quartz-carbonate veinlets; *b* – image of the stereological core model obtained through core scanning at 100 μm resolution, ore mineralization (sulf) is colored violet, orange circle indicates the location of taking a cylinder sample for detailed CT imaging, see Fig. 2, *c*; *c* – pattern of arsenopyrite and gold grain distribution in 16 mm diameter cylinder obtained in CT imaging at 4.5 μm resolution, the red line shows the plane of the section cut; *d* – microscope-generated photo of ore minerals in polished section shown in Fig. 2, *c* (Py – pyrite, Apy – arsenopyrite, Au – gold)

структурных элементов в масштабах месторождения предпочтительнее использовать детальную цифровую модель полноразмерного керна, отобранного из скважин, пройденных на нескольких ключевых участках объекта. Кроме того, немаловажным фактором является высокая производительность сканирования, так как при больших объёмах каменного материала съёмка небольшого образца в течение нескольких часов будет долгим и дорогостоящим процессом. На основании вышеизложенного основной задачей данной работы стало получение подробной и достоверной стереологической модели полноразмерного образца керна за приемлемый период времени, а также демонстрация методики анализа и интерпретация получаемых данных.

КТ-съёмка полноразмерного образца. Для решения поставленной задачи было выполнено последовательное КТ-сканирование образца керна на двух энергиях – низких (80 кэВ) и высоких (130 кэВ). Исследование проводилось на томографе SIEMENS Somatom Perspective (Siemens, Германия). На нём установлены детектор из «ультрабыстрой керамики» (UFC – Ultra Fast Ceramics) и высокопроизводительная рентгеновская трубка DURA 688 MV, которые позволяют сканировать керн со скоростью 1 метр в минуту при максимальном разрешении 97,5 мкм для диаметра 50 мм. Напряжение на трубке от 80 до 130 кэВ, сила тока 200 мА. Исследуемый образец керна помещался в пластиковую трубу, заполненную кварцевым песком, и располагался в томографе в горизонтальной плоскости. Съёмка велась в спиральном режиме с разрешением 130 мкм.

В результате сканирования образца на двух энергиях были получены два первичных набора рентгеноплотностных срезов (стека данных) с проявлением разных эффектов поглощения рентгеновского излучения. Результатом любого рентгенотомографического измерения являются стеки дискретных изображений, в которых яркость каждой точки может определяться двумя физическими параметрами материала объекта: плотностью и эффективным атомным номером. На рентгено-

плотностных срезах, полученных при съёмке на низкой энергии, высокой рентгеновской контрастностью обладают минералы со схожими плотностными свойствами, но различным Z_{eff} – это кварц, карбонатные минералы и алевропесчаники (рис. 3, *b*). Наиболее ярким оттенком (белым) отражена сульфидная минерализация без разделения на минеральные индивиды. На срезах, полученных при съёмке на высокой энергии, наибольшая рентгеновская контрастность проявлена у минералов с высокой плотностью – пирита, арсенопирита и золота. Жильные минералы и вмещающие алевропесчаники на данных срезах характеризуются единым оттенком серого. В результате при обработке двух наборов рентгеноплотностных срезов получены стереологические модели как для жильных, так и для рудных минералов (см. рис. 3, *c*).

Обработка и визуализация стеков данных проводилась в различных специализированных компьютерных приложениях, таких как CTan и DataViewer (Bruker Corporation), Avizo 3D (Thermo Fisher) и т. д. Каждое приложение демонстрирует пространственное распределение выделенных рентгеноконтрастных компонентов и, в зависимости от поставленных задач, имеет своё преимущество в работе со стеками данных. Заверка получаемых стереологических моделей осуществлялась путём прицельного выпиливания пластин для изготовления прозрачно-полированных шлифов и их изучения под микроскопом (рис. 4).

Анализ и интерпретация результатов КТ-сканирования. Работа с результатами КТ-сканирования начинается с детального анализа рентгеноплотностных срезов в градации серого. Такой анализ выполняется в целях выявления слабоконтрастных рентгеноплотностных фаз*, которые могут нести важную геологическую информацию, однако используемые

* Рентгеноконтрастная фаза используется применительно к смеси компонентов, которые при данных условиях съёмки имеют близкие характеристики рентгеновского поглощения. Возможность их разделения как самостоятельных минеральных фаз появляется в процессе съёмки при более высоком разрешении.

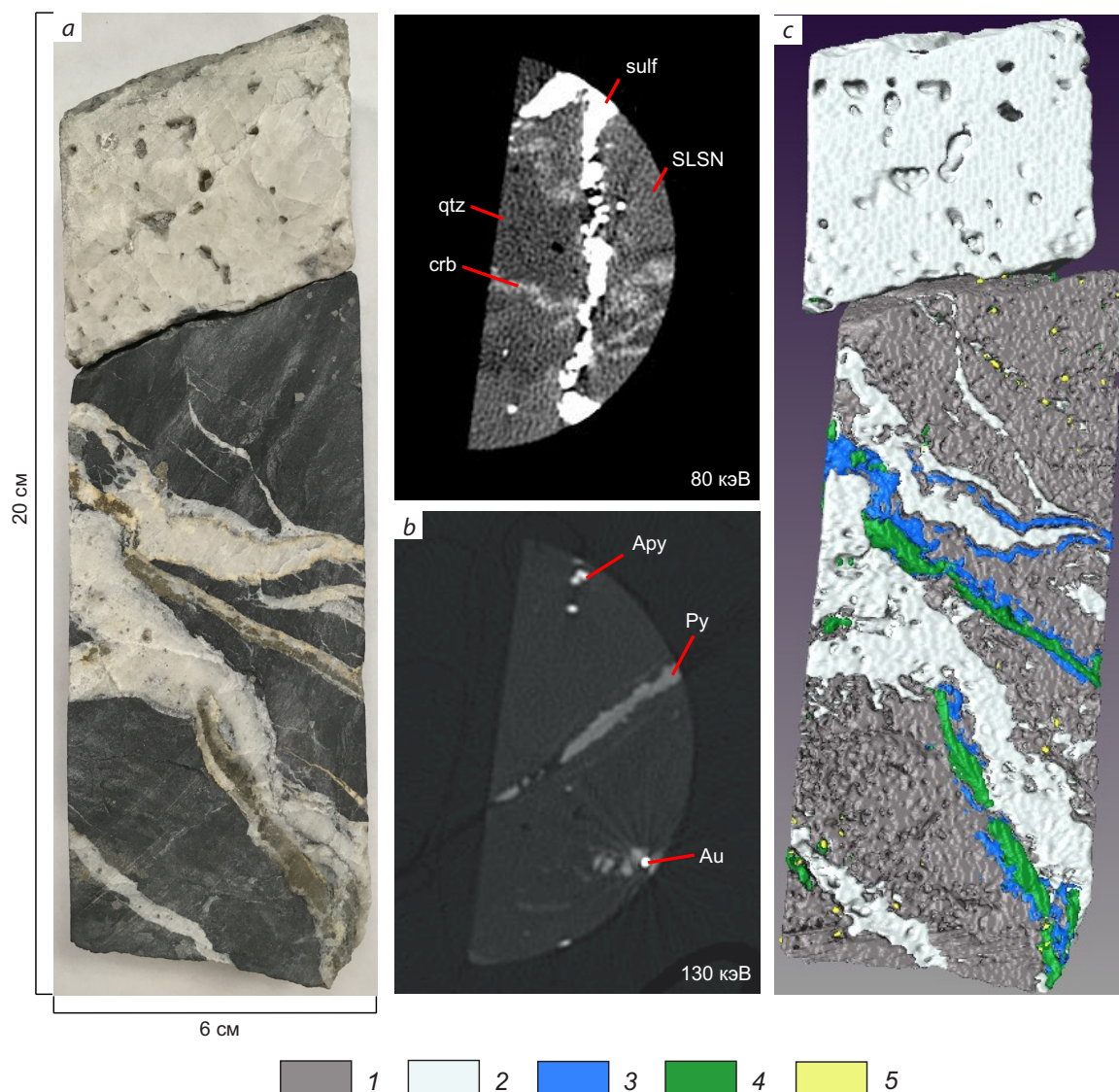


Рис. 3. Изучаемый образец ядра и его стереологическая модель:

a – фото образца; *b* – рентгеноплотностные срезы, полученные в результате съёмки на двух энергиях и дальнейшей специальной обработки данных КТ (qtz – кварц, crb – карбонаты, sulf – сульфиды, SLSN – алевропесчаник); *c* – изображение стереологической модели ядра, визуализация выполнена в программе Avizo 3D (1 – алевропесчаники, 2 – кварц, 3 – карбонаты, 4 – пирит, 5 – арсенопирит); остальные усл. обозн. см. рис. 2

Fig. 3. Core sample studied and its stereological model:

a – sample photo; *b* – X-ray density sections obtained as a result of imaging at two energies and further special processing of CT data (qtz – quartz, crb – carbonate, sulf – sulfides, SLSN – silt sandstone); *c* – stereological core model, Avizo 3D software was used for visualization (1 – silt sandstone, 2 – quartz, 3 – carbonate, 4 – pyrite, 5 – arsenopyrite); see Fig. 2 for other legend

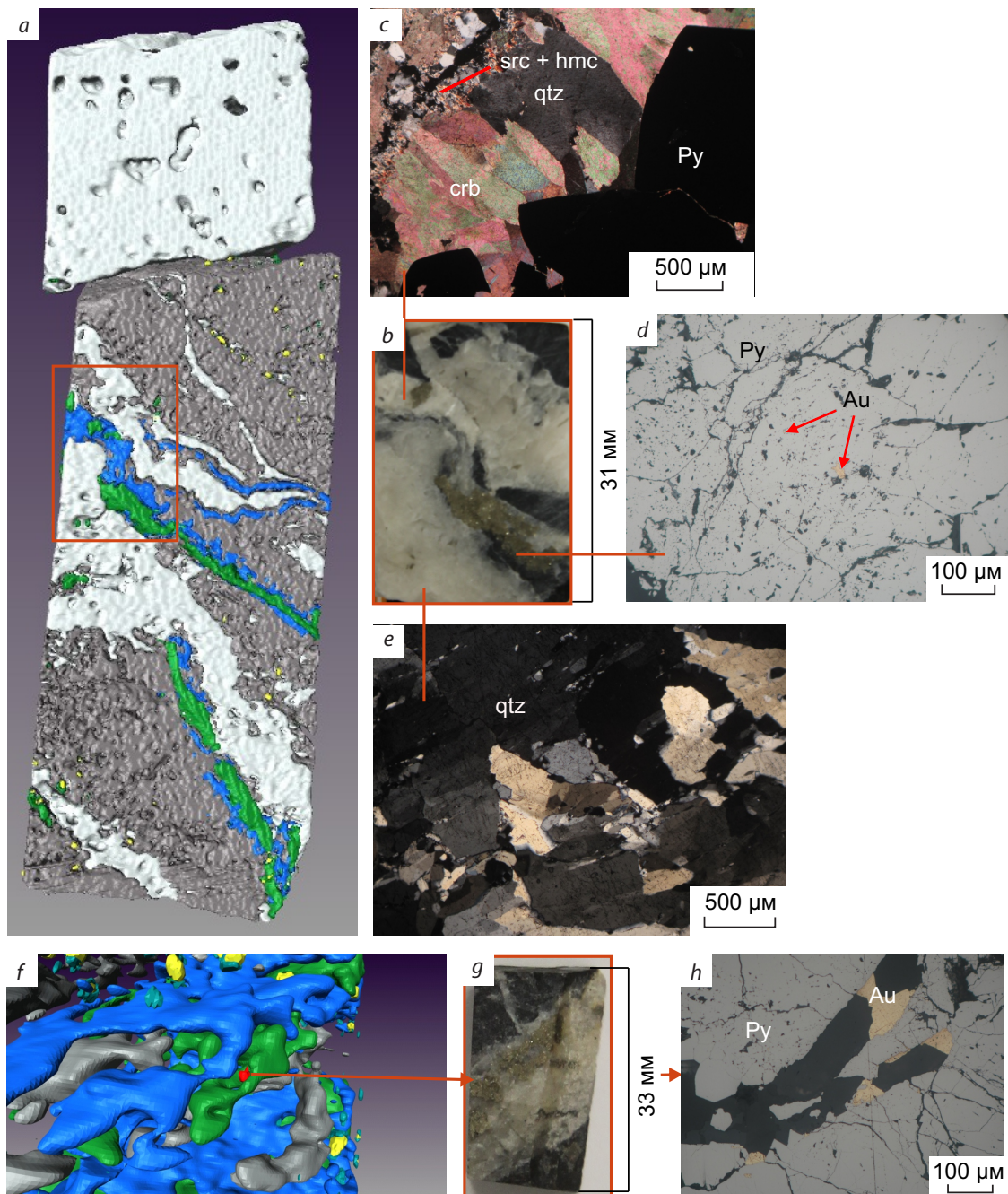


Рис. 4. Стереологическая модель изучаемого образца и фотографии изготовленных из него прозрачно-полированных шлифов:

a, f – стереологические модели; *b, g* – участки изготовления шлифов; *c–e, h* – фото шлифов; ser – серицит, hmc – минералы группы гидрослюд; остальные усл. обозн. см. рис. 2, 3

Fig. 4. Stereological model of the sample studied and photos of polished sections prepared from it:

a, f – stereological models; *b, g* – locations of polished section preparation; *c–e, h* – photos of polished sections; ser – sericite, hmc – hydromica minerals; see Figs. 2, 3 for other legend

компьютерные алгоритмы не всегда могут их фиксировать и визуализировать (рис. 5, *a*).

На полученных срезах выделены следующие рентгеноконтрастные компоненты: кварц, карбонатные минералы, пирит, арсенопирит и золото (см. рис. 3, *b*, *c*). Зёрна пирита, образующие лентовидные скопления в кварц-карбонатных прожилках, имеют небольшое различие в поглощении. Для центральной области скопления зёрен минерала характерны более высокоабсорбционные характеристики, чем у зёрен, расположенных по периферии (см. рис. 3, *b*; см. рис. 5, *a*). Такая неоднородность указывает либо на различный химический состав зёрен минерала, либо на различные плотностные характеристики. Согласно исследованию минерального состава руд на месторождении Дрожное в золотоносных кварц-карбонатных прожилках присутствуют две генерации пирита, которые отнесены к полисульфидной стадии гидротермально-метасоматического этапа [4]. Зёрна более ранней генерации минерала Py-2 (1) на рис. 5 имеют псевдодлиннопризматическую форму выделения и являются результатом процесса замещения раннего пиритина пиритом при повышении фугитивности серы fS_2 . В данном пирите не выявлена примесь As, но присутствуют примеси Ni (0,19–1,03 мас. %) и Co (~ 0,5 мас. %) (таблица).

Кроме того, во всех изученных шлифах золота в виде включений наблюдается исключительно в данной разновидности пирита. Выделения поздней генерации пирита Py-2 (2) (см. рис. 5) обрастают ранний псевдодлиннопризматический пирит и содержат в своём химическом составе примесь мышьяка от 1 до 3,36 мас. %. Различие в химическом составе зёрен минерала напрямую влияет на один из его физических параметров – Z_{eff} , который в данном случае изменяется с 21,7 (FeS₂) на 21,2 (FeS₂ (+As)), а наличие включений золота в одной из генераций пирита может повлиять на показатель поглощения среды, пропорционального Z . В результате на рентгеноплотностных срезах лентовидные скопления пирита имеют неоднородные абсорбционные характеристики: резкий переход от более тёмного оттенка серого в центральной

области скопления к более светлому по периферии.

Выявленное различие рентгеновской абсорбции, выраженное в оттенках серого у пирита различных генераций, слабоконтрастное. Тем не менее, при работе со стереологическими моделями в специализированных программных приложениях есть возможность выделить данные скопления пирита (слабоконтрастную рентгеноплотностную фазу) и присвоить им уникальный цвет. Таким образом, полученная информация имеет чёткую пространственную привязку, отображена на стереологической модели и в дальнейшем будет учитываться при детальном структурно-минералогическом исследовании цифровой модели зерна.

Далее был выполнен детальный структурно-минералогический анализ визуализированной цифровой модели зерна (рис. 6). На стереологической модели установлены прожилки, имеющие кварцевый, кварц-карбонатный и карбонат-кварц-сульфидный составы. Морфология прожилков различна – от простых прямолинейных до извилистых и ветвящихся. Наиболее ранние образования представлены кулисно расположенными кварцевыми прожилками по трещинам отрыва мощностью до 0,3–0,4 мм. Они имеют секущее положение к слоистости (угол > 60°).

В центральной части цифровой модели зерна установлено пересечение ранних кварцевых прожилков более мощным кварц-карбонатным, имеющим Z -образную морфологию (см. рис. 6, *a*, розовая линия). При его изучении под микроскопом обнаружены структуры дислокационного скольжения (волнистое погасание) и рекристаллизации (см. рис. 4, *e*). Карбонатные минералы приурочены к микротрещинам, пересекающим зёрна более раннего кварца.

Прожилки карбонат-кварц-пиритового состава пересекают под различными углами ранее образованные кварц-карбонатные кварцевые прожилки и частично наследуют их морфологию (см. рис. 6, *b*). Выделения карбонатных минералов в карбонат-кварц-пиритовых прожилках не деформированы, что ука-

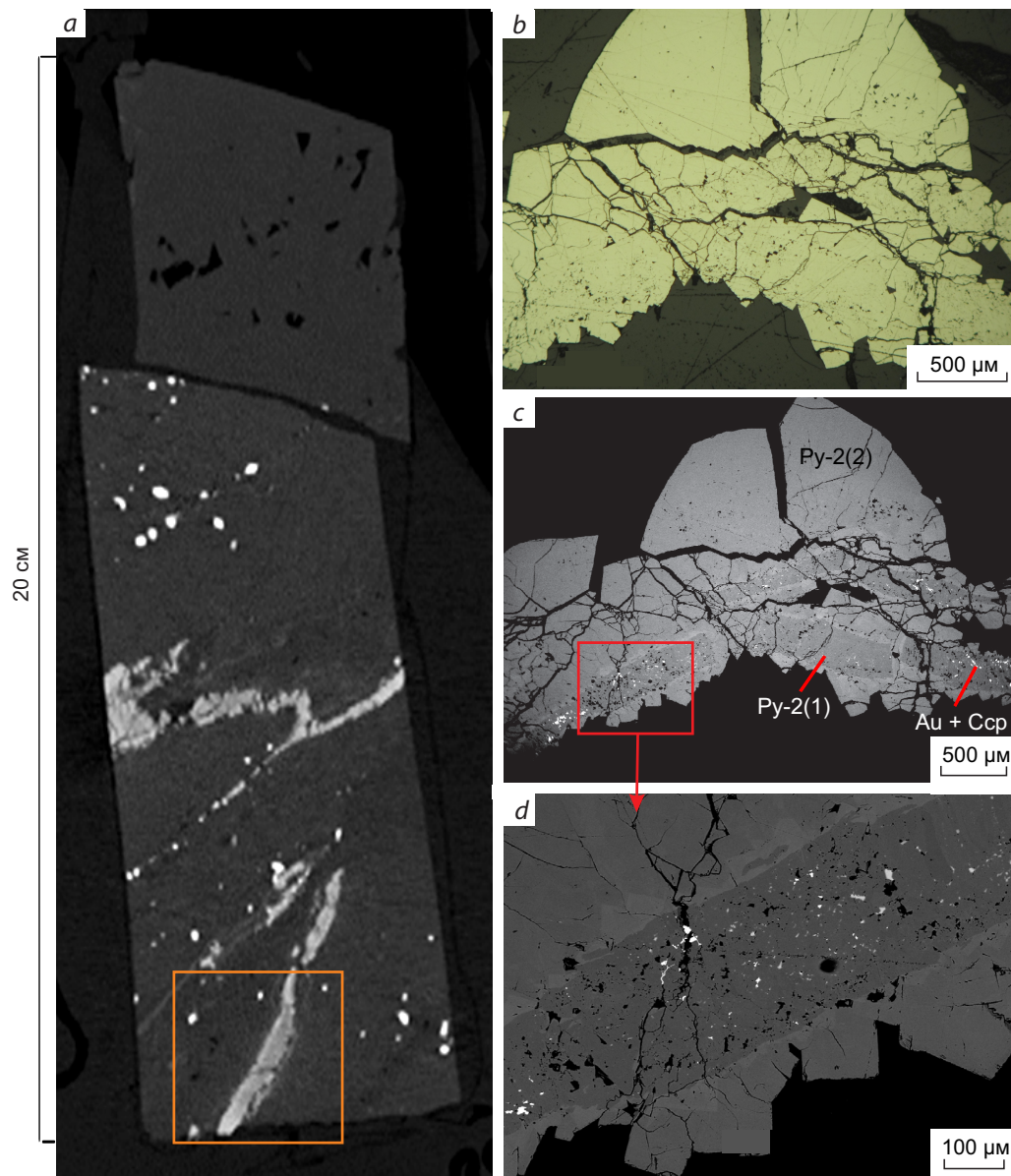


Рис. 5. Анализ рентгеноплотностных срезов:

a – изучаемый образец в градации серого, оранжевый квадрат – участок срастания раннего (Py-2 (1)) и позднего пирита с примесью As (Py-2 (2)) в золотоносном кварц-карбонатном прожилке; *b* – фото скоплений пирита различных генераций в шлифе под микроскопом; *c* – фото шлифа в отражённых электронах; *d* – детализация участка, выделенного красным квадратом; Ccp – халькопирит; остальные усл. обозн. см. рис. 2, 3

Fig. 5. Analysis of X-ray density sections:

a – image of the sample studied (gray color shades), orange square shows an area of intergrowth of early (Py-2 (1)) and late pyrite with As traces (Py-2 (2)) in gold-rich quartz-carbonate veinlet; *b* – photo of pyrite clusters (various generations are present) in microscopically studied polished section; *c* – reflected electron polished section photo; *d* – detalization of the area shown as a red square; Ccp – chalcopyrite; see Figs. 2, 3 for other legend

Состав пирита золотоносных кварц-карбонатных прожилков по данным электронно-зондового анализа (мас. %)

Pyrite composition of gold-rich quartz-carbonate veinlets, based on electron probe analysis data (weight %)

Номера замера	S	Fe	As	Cu	Co	Ni	Sb	Сумма	Генерация пирита
1	51,07	45,84	3,36					100,26	Pу-2 (2)
2	51,39	45,94	2,1					99,44	Pу-2 (2)
3	53,27	46,73						99,97	Pу-2 (1)
4	53,5	46,71						100,17	Pу-2 (1)
5	51,46	46,14	3,02					100,62	Pу-2 (2)
6	53,34	46,49						99,82	Pу-2 (1)
7	53,2	46,66						99,84	Pу-2 (1)
8	51,63	46,17	2,55					100,35	Pу-2 (2)
9	51,68	46,28	2,14					100,1	Pу-2 (2)
10	50,81	45,55	2,92					99,28	Pу-2 (2)
11	52,96	46,27						99,23	Pу-2 (1)
12	51,2	45,7	2,72					99,63	Pу-2 (2)
13	51,51	45,81	1,6					98,92	Pу-2 (2)
14	51,78	45,83	1,9					99,51	Pу-2 (2)
15	52,1	45,07	1,23					98,4	Pу-2 (2)
16	52,04	45,14	2,63					99,81	Pу-2 (2)
17	52,47	45,45			0,4			98,32	Pу-2 (1)
18	52,37	45,81			0,35	0,19		98,71	Pу-2 (1)
19	51,35	45,25			0,44	0,53		97,57	Pу-2 (1)
20	51,34	45,03		0,17	0,31	0,36	0,04	97,26	Pу-2 (1)
21	51,69	44,88		0,05	0,43	1,03		98,09	Pу-2 (1)

зывает на их образование на более поздних этапах. Пиритовая минерализация более поздняя по отношению к кварцу и карбонату, о чём говорит их локализация вдоль наиболее ослабленных направлений, которыми являются зальбанды прожилков (см. рис. 4, *b*, *c*). Пирит представлен двумя генерациям, одна из которых содержит включение золота. Арсенопирит в данных прожилках встречается в виде единичных зёрен.

Мощная жила кварцевого состава занимает текущее положение ко всем описанным выше прожилкам и не содержит какой-либо сульфидной минерализации. Пустоты, проявленные на стереологической модели жилы, отражают её друзовидную текстуру (см. рис. 6, *a*).

Сульфидная минерализация наблюдается как во вмещающих породах, так и в прожилках. Пирит и арсенопирит, локализованные в терригенно-осадочных толщах, представлены самостоятельными выделениями и, на первый взгляд, неравномерно распределены по породе (см. рис. 6, *d*). Однако при повороте стереологической модели вокруг вертикальной оси проявляются плоскостные направления в распределении зёрен этих минералов (микротренды), что указывает на наличие ослабленных зон в породе (микропроницаемость или микротрещиноватость). Микротренды имеют как текущее, так и согласное положение к слоистости и прожилкам. Описанные выше выделения пирита и арсенопирита, согласно

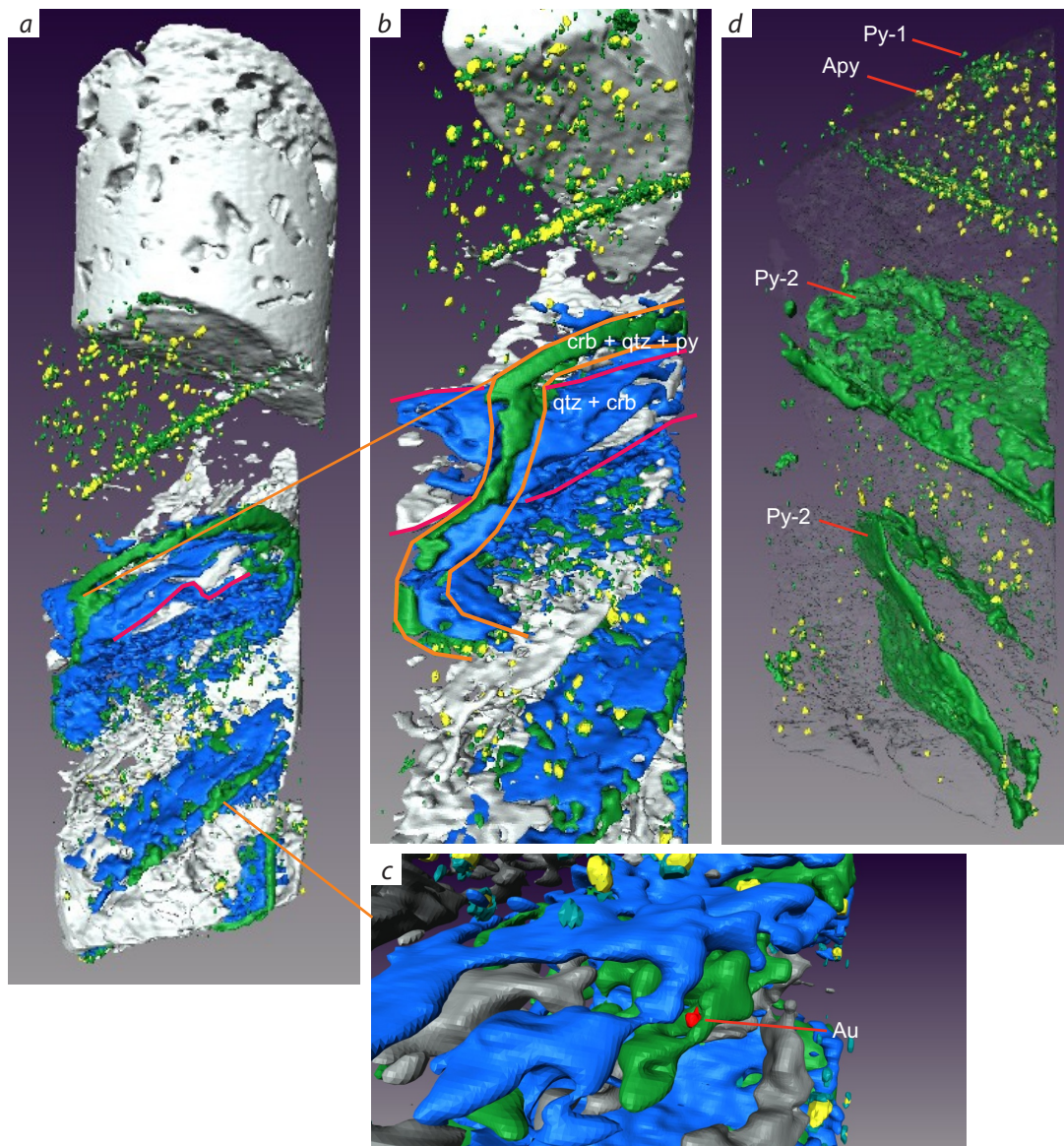


Рис. 6. Стереологическая модель изучаемого образца керна:

a – стереологическая модель керна (без алевропесчаников); *b* – участок пересечения кварц-карбонатного прожилка (qtz + crb) прожилками карбонат-кварц-пиритового состава (crb + qtz + py); *c* – золото в прожилке кварц-карбонатного состава; *d* – арсенопирит и пирит ранней генерации (Py-1) образуют неравномерные скопления зёрен в алевропесчаниках, пирит более поздней генерации (Py-2) образует лентовидные скопления в кварц-карбонатных прожилках; остальные усл. обозн. см. рис. 2, 3

Fig. 6. Stereological model of the core sample studied:

a – stereological core model (no silt sandstone); *b* – area of quartz-carbonate (qtz + crb) veinlet intersection by carbonate-quartz-pyrite (crb + qtz + py) veinlets; *c* – gold in quartz-carbonate veinlet; *d* – arsenopyrite and early pyrite (Py-1) form irregular grain clusters in silt sandstone, later pyrite (Py-2) forms ribbon clusters in quartz-carbonate veinlets; see Figs. 2, 3 for other legend

минералогическим исследованиям, относятся к ранней стадии гидротермально-метасоматического этапа [4].

Пирит, слагающий лентовидные скопления зёрен в карбонат-кварц-сульфидных прожилках, образовался позднее, и по данным изучения шлифов и рентгеноплотностных срезов представлен двумя генерациями, охарактеризованными ранее (см. рис. 5). В одном из прожилков карбонат-кварц-сульфидного состава, расположенного в нижней части цифровой модели ядра, установлено самостоятельное выделение золота, локализованное по трещинам в пирите (см. рис. 4, *f-h*). Золотины также выявлены во вмещающих породах, где минерал тяготеет к зонам повышенной концентрации пирита и арсенопирита.

Интерпретация полученных результатов. По результатам визуального изучения ядра, его стереологической модели и изготовленных из него прозрачно-полированных шлифов все выделенные жильные минералы и рудная минерализация были разделены на генерации (рис. 7, *a-d*). Каждой генерации минерала на стереологической модели присвоен определённый цвет. С учётом всех выявленных в образце ядра структурных и минералогических особенностей, а также знаний о минеральном составе руд и структуре золоторудного месторождения Дражное [1, 3–5], предложена предварительная структурно-минералогическая интерпретация.

Этап 1 (дорудный). На первом этапе формировались пологие и крутопадающие прожилки кварцевого состава (qtz_1) (см. рис. 7). Кварц, вероятно, заполнял складчатые трещины скола и отрыва, образование которых происходило в надвиговом поле напряжений (в координатах образца).

Этап 2 (рудный). На первой стадии рудного этапа продолжалось формирование кварцевых прожилков (qtz_2). Несколько позже, в процессе прогрессивной деформации, начали отлагаться ранние карбонатные минералы ($carb$) по новообразованной системе трещин и, возможно, ранние пирит (py_1) и арсенопирит (apy) в терригенно-осадочных толщах. На цифровой модели ядра отчётливо прослеживается

зависимость локализации пирита и арсенопирита от деформационной анизотропии осадочной толщи. Минералы тяготеют к ослабленным зонам во вмещающих породах (кливаж, послойные срывы, контакты разнородных сред и т. д.), а также заполняют инфраструктуру микротрещин (микроструктурные ловушки). Возможно, отложение минеральной ассоциации первой стадии второго этапа также происходило в надвиговом поле напряжений.

На второй стадии второго этапа формировались золотоносные карбонат-кварц-сульфидные прожилки. Рудоносные структуры пересекают ранние кварцевые и кварц-карбонатные прожилки, что, вероятно, может быть связано с формированием первых в сменявшемся поле напряжений. На результативных стереологических моделях, представленных на рис. 7, *a-d*, рудоносные прожилки включают пирит второй генерации (py_2). По результатам минералогических исследований и детального изучения рентгеноплотностных срезов пирит данной генерации на стереологической модели объединяет две его разновидности: ранний, с включениями золота ($Py-2$ (1)), и поздний ($Py-2$ (2)), с примесью мышьяка до 3,36 мас. % (см. рис. 5; см. таблицу). Завершает вторую стадию второго этапа отложение золота. Самостоятельные выделения золота приурочены к зонам повышенных концентраций раннего пирита и арсенопирита в терригенно-осадочных толщах, а также локализованы в прожилках кварц-карбонат-сульфидного состава. Выявленное золото в алевропесчаниках указывает на наличие в этих породах микроструктурных трендов, по которым осуществлялось движение золотоносных гидротермальных растворов.

Этап 3 (пострудный). На заключительном, третьем, этапе формировались пологие жилы (в координатах образца) крупнокристаллического кварца третьей генерации (qtz_3), секущие ранее образованные структуры.

Выводы. В результате выполненной работы предложены методология комплексного изучения ядра методом рентгеновской компьютерной томографии, а также последовательность обработки получаемой информации и

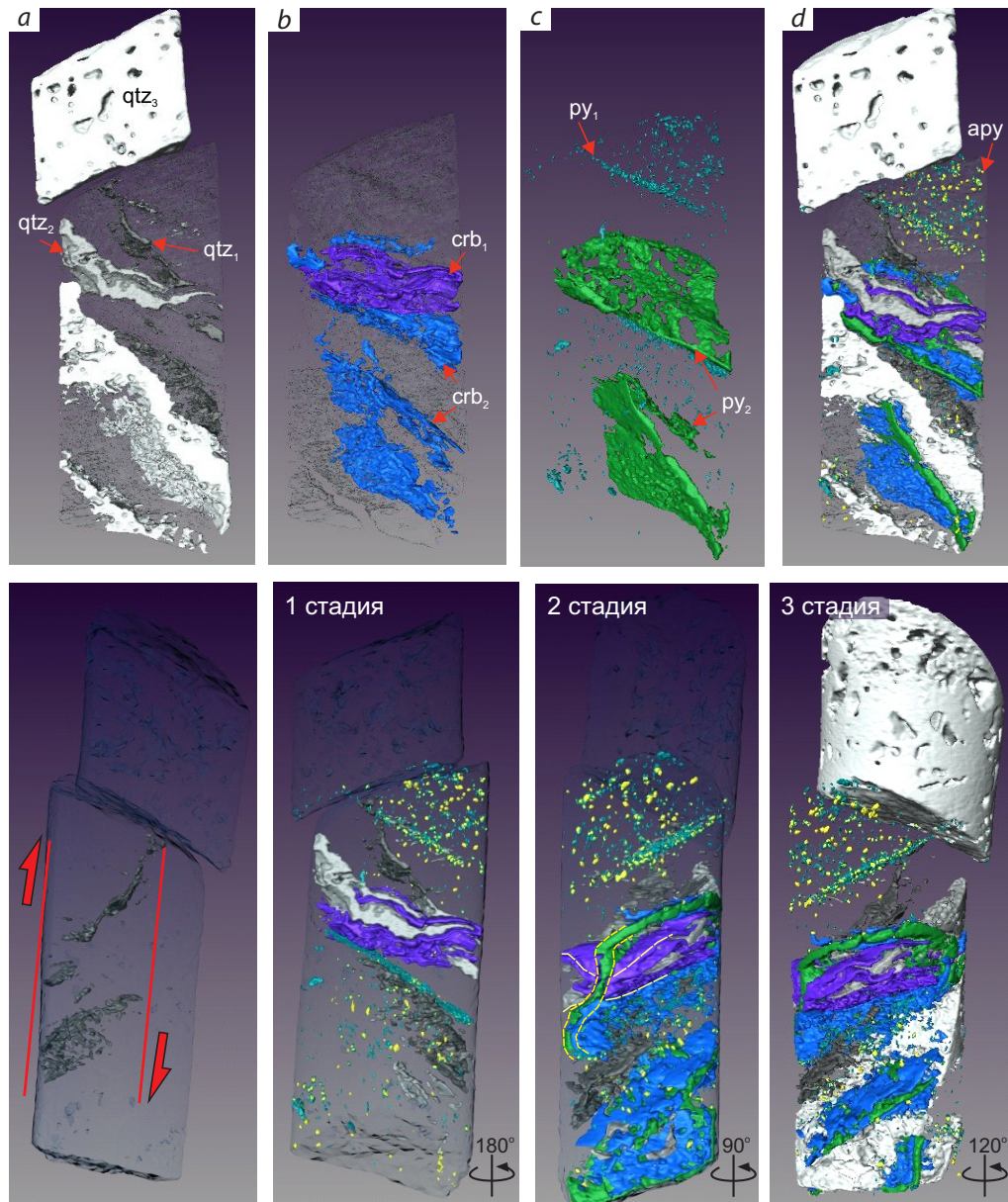


Рис. 7. Этапы и стадии минералообразования в изучаемом образце керна:

a–d – стереологические модели минералов, разделённых на генерации (подстрочным индексом указана генерация); в нижнем ряду приведена структурно-минералогическая интерпретация керна (красными стрелками показана кинематика зоны кулисных прожилков, в правых нижних углах даны углы поворота стереологической модели вокруг своей оси); остальные усл. обозн. см. рис. 2, 3

Fig. 7. Mineral formation stages in the core sample studied:

a–d – stereological models of each mineral divided into generations (subscript denotes generation); the lower side depicts structural and mineralogical core interpretation (red arrows show kinematics of imbricate veinlet zone, right lower angles show stereological model angle of rotation around its axis; see Figs. 2, 3 for other legend

её предварительная структурно-минералогическая интерпретация. По данным КТ-сканирования получена цифровая модель ядра, отражающая детальную трёхмерную геолого-структурную информацию. На основании изучения рентгеноплотностных срезов, визуализированной цифровой модели и петрографического описания шлифов выделена последовательность минералообразования, установлены рудоносные прожилки и проанализировано их положение в общем строении жильно-прожилковой зоны, а также предложена предварительная структурно-минералогическая интерпретация структурных обстановок формирования рудной минерализации и прожилков. Таким образом, на основе получаемых цифровых моделей геологических образцов появляется возможность устанавливать многоэтапные структурно-минералогические парагенезы и определять их роль в эволюции рудной гидротермальной системы.

Детальная стереологическая модель полноразмерного образца ядра была получена

в результате его последовательного КТ-сканирования на высоких и низких энергиях. На сегодняшний день такое сканирование 1 м ядра является довольно быстрым процессом и занимает со всеми подготовительными операциями порядка 10–15 минут. Обработанные стереологические модели экспортируются из специализированных компьютерных приложений в широком объёме форматов, что позволяет их использовать в программах для геологического и блочного моделирования и подсчёта запасов, таких как Micromine (Micromine, Австралия), Leapfrog (Seequent, Новая Зеландия) и т. д. Увязка получаемых цифровых моделей ядра с объёмными моделями рудоносных структур и рудных тел значительно повысит детальность и достоверность моделирования структуры месторождения. Точная пространственная информация о залегании наиболее золотоносных прожилков позволит уточнить параметры сети бурения, угол и азимут бурения, что, в свою очередь, повысит достоверность оценки запасов объекта.

Список литературы

1. Аристов В. В., Прокофьев В. Ю., Имамендинов Б. Н. [и др.] Особенности рудообразования на золото-кварцевом месторождении Дражное (Восточная Якутия, Россия) // Доклады академии наук. – 2015. – Т. 464, № 1. – С. 65–70.
2. Корост Д. В. Неоднородность строения терригенных коллекторов и типы структуры их пустотного пространства: на примере верхней части тюменской свиты Урненского нефтяного месторождения Западной Сибири : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» : дис. на соискание учёного степен. канд. геол.-минерал. наук / Корост Дмитрий Вячеславович. – М., 2012. – 175 с.
3. Чикатуева В. Ю., Сивков Д. В., Читалин А. Ф. Опыт использования рентгеновской томографии при структурных исследованиях золоторудного штокверка месторождения Дражное, Республика Саха (Якутия) // Материалы Международной геолого-геофизической конференции и выставки ГеоЕвразия – 2019. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии. – 2019. – С. 431–435.
4. Чикатуева В. Ю., Ситкевич С. А. Минералогия золоторудного месторождения Дражное, Республика Саха (Якутия) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2019. – № 5. – С. 57–63.
5. Читалин А. Ф., Воскресенский К. И., Гришин Е. М. [и др.] Структурно-кинематическая модель золоторудного месторождения Дражное // Геофизика. – 2018. – № 3. – С. 106–114.
6. Шкловер В. Я., Артемов Н. А., Маряев И. Г. [и др.] Технология анализа и цифрового моделирования ядра как составляющая часть инфраструктуры «цифрового месторождения». От геологоразведки до промышленной эксплуатации // Недропользование XXI век. – 2018. – № 5. – С. 84–95.
7. Carmignato S., Dewulf W., Leach R. Industrial X-Ray Computed Tomography // Springer International Publishing. – 2018. – 369 p.

8. Guntoro P., Ghorbani Y., Koch P., Rosenkranz J. X-ray Microcomputed Tomography (μ CT) for Mineral Characterization: A Review of Data Analysis Methods // *Minerals*. – 2019. – № 9 (3). – P. 183. – doi.org/10.3390/min9030183.
9. Korost D. V., Ariskin A. A., Pshenitsyna I. V., Khomyak A. N. X-Ray Computed Tomography as a Method for Reproducing 3D Characteristics of Sulfides and Spinel Disseminated in Plagioclones from the Yoko-Dovyren Intrusion // *Petrology*. – 2019. – V. 27, № 4. – P. 370–385. – DOI: 10.1134/S0869591119040040.
10. Korost D., Belokhin V., Kudaev A., Khomyak A., Asryan S. Technologies for the Study of Full-Size Core with CT and Numerical Simulation Methods // *Society of Petroleum*. – 2019. – P. 17. – DOI: 10.2118/196927-MS.
11. Kyle J. R., Ketcham R. A. Application of high resolution X-ray computed tomography to mineral deposit origin, evaluation and processing // *Ore Geology Reviews*. – 2014. – doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.034.
12. Vukmanovic Z., Barnes S., Reddy S., Godel B., Fiorentini M. Morphology and microstructure of chromite crystals in chromitites from the Merensky Reef (Bushveld Complex, South Africa) // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2013. – V. 165. – P. 1031–1050. – DOI: 10.1007/s00410-012-0846-1.

References

1. Aristov V. V., Prokof'ev V. Yu., Imamendinov B. N. [et al.] Osobennosti rudoobrazovaniya na zoloto-kvartsevom mestorozhdenii Drazhnoe (Vostochnaya Yakutiya, Rossiya) [Features of ore formation at the Drazhnoye gold and quartz deposit (Eastern Yakutia, Russia)], *Doklady akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 2015, V. 464, No 1, pp. 65–70. (In Russ.).
2. Korost D. V. Neodnorodnost' stroeniya terrigenykh kollektorov i tipy struktury ikh pustotnogo prostranstva: na primere verkhnei chasti tyumenskoi svity Urnenskogo neftyanogo mestorozhdeniya Zapadnoi Sibiri [Heterogeneity of the structure of terrigenous reservoirs and types of structure of their void space: on the example of the upper part of the Tyumen formation of the Urnensky oil field in Western Siberia: Extended abstract of candidate's thesis], Moscow, 2012, 175 p.
3. Chikatueva V. Yu., Sivkov D. V., Chitalin A. F. Opyt ispol'zovaniya rentgenovskoi tomografii pri strukturnykh issledovaniyakh zolotorudnogo shtokverka mestorozhdeniya Drazhnoe, Respublika Sakha (Yakutiya) [The experience of using X-ray tomography in structural studies of the gold ore stockwork of the Drazhnoye deposit, Republic of Sakha (Yakutia)], *Materialy Mezhdunarodnoi geologo-geofizicheskoi konferentsii i vystavki GeoEvraziya – 2019. Sovremennye tekhnologii izucheniya i osvoeniya nedr Evrazii [Materials of the International Geological and Geophysical conference and exhibition GeoEurasia – 2019. Modern technologies for studying and developing the subsoil of Eurasia]*, 2019, pp. 431–435.
4. Chikatueva V. Yu., Sitkevich S. A. Mineralogiya zolotorudnogo mestorozhdeniya Drazhnoe, Respublika Sakha (Yakutiya) [Mineralogy of the Drazhnoye gold deposit, Republic of Sakha (Yakutia)], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration]*, 2019, No 5, pp. 57–63. (In Russ.).
5. Chitalin A. F., Voskresenskii K. I., Grishin E. M. [et al.] Strukturno-kinematische model' zolotorudnogo mestorozhdeniya Drazhnoe [Structural and kinematic model of the Drazhnoye gold deposit], *Geofizika [Geophysics]*, 2018, No 3, pp. 106–114. (In Russ.).
6. Shklover V. Ya., Artemov N. A., Maryasev I. G. [et al.] Tekhnologiya analiza i tsifrovogo modelirovaniya kerna kak sostavlyayushchaya chast' infrastruktury "tsifrovogo mestorozhdeniya". Ot geologorazvedki do promyshlennoi ekspluatatsii [Core analysis and digital modeling technology as an integral part of the infrastructure of the "digital deposit". From geological exploration to industrial operation], *Nedropol'zovanie XXI vek [Subsoil use XXI century]*, 2018, No 5, pp. 84–95. (In Russ.).
7. Carmignato S., Dewulf W., Leach R. Industrial X-Ray Computed Tomography, *Springer International Publishing*, 2018, 369 p.
8. Guntoro P., Ghorbani Y., Koch P., Rosenkranz J. X-ray Microcomputed Tomography (μ CT) for Mineral Characterization: A Review of Data Analysis Methods, *Minerals*, 2019, No 9 (3), pp. 183, doi.org/10.3390/min9030183.



9. Korost D. V., Ariskin A. A., Pshenitsyna I. V., Khomyak A. N. X-Ray Computed Tomography as a Method for Reproducing 3D Characteristics of Sulfides and Spinel Disseminated in Plagioclones from the Yoko-Dovyren Intrusion, *Petrology*, 2019, V. 27, No 4, pp. 370–385, DOI: 10.1134/S0869591119040040.
10. Korost D., Belokhin V., Kudaev A., Khomyak A., Asryan S. Technologies for the Study of Full-Size Core with CT and Numerical Simulation Methods, *Society of Petroleum*, 2019, pp. 17, DOI: 10.2118/196927-MS.
11. Kyle J. R., Ketcham R. A. Application of high resolution X-ray computed tomography to mineral deposit origin, evaluation, and processing, *Ore Geology Reviews*, 2014, doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.034.
12. Vukmanovic Z., Barnes S., Reddy S., Godel B., Fiorentini M. Morphology and microstructure of chromite crystals in chromitites from the Merensky Reef (Bushveld Complex, South Africa), *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2013, V. 165, pp. 1031–1050, DOI: 10.1007/s00410-012-0846-1.

Авторы

Чикатуева Виктория Юрьевна

геолог¹

v.chikatueva@igeotech.ru

Степанов Никита Валерьевич

инженер-программист²

stepanov-nikita13@rambler.ru

Читалин Андрей Фёдорович

кандидат геолого-минералогических наук

главный геолог¹

a.chitalin@igeotech.ru

Корост Дмитрий Вячеславович

кандидат геолого-минералогических наук

научный сотрудник³

dkorost@mail.ru

¹ ООО «Институт геотехнологий», г. Москва

² ООО «Деко-сервис», г. Москва

³ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова», г. Москва

Authors

Victoria Yu. Chikatueva

Geologist¹

v.chikatueva@igeotech.ru

Nikita V. Stepanov

Software engineer²

stepanov-nikita13@rambler.ru

Andrey F. Chitalin

PhD

Chief geologist¹

a.chitalin@igeotech.ru

Dmitry V. Korost

PhD

Researcher³

dkorost@mail.ru

¹ LLC "Institute of Geotechnologies", Moscow, Russia

² LLC "Deco Service", Moscow, Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia