

цированного прогностического индикатора. Полученные экспериментальные данные — стабилизация (исчезновение) приливного параметра уровня подземных вод для краткосрочного прогноза времени (от 1 до 10 сут) готовящего сильного землетрясения и зона аномального атмосферного давления для регистрации его географического положения и силы — оказываются необходимыми и достаточными для проведения сейсмического прогноза.

Последующие проблемы связаны с разработкой надежных способов энергорегулирования очага сильного землетрясения с целью предотвращения сейсмопроцесса и утилизации сейсмозапасов путем ее энергоотвода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вартамян Г.С., Волейшо В.О. Способ краткосрочного прогнозирования землетрясений. — А.с. 1384.043 СССР. 18.07.1988.
2. Вартамян Г.С., Попов К.А., Волейшо В.О. Способ пригодности гидрогеологического или геофизического объекта наблюдений для изучения геодинамических процессов. — А.с. 1303957 СССР, А1 У9/00.

3. Волейшо В.О., Круподерова О.Е. Развитие сейсмической обстановки на территории России в 2012 г. по данным гидрогеодинамического (ГГД) мониторинга // Разведка и охрана недр. — 2013. — № 5. — С. 37–41.
4. Волейшо В.О., Куликов Г.В. Критерии оценки изменения напряженно-деформированного состояния земной коры по данным гидрогеодинамического мониторинга / Изв. вузов. Геология и разведка. — 2006. — № 5. — С. 37–42.
5. Волейшо В.О. Введение в гидрогеосейсмологию (гидрогеодинамический аспект). — Ногинск, 2011.
6. Герловин И.Л. Основы единой теории всех взаимодействий в веществе. — Л.: Энергоатомиздат, 1990.
7. Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. — Королев: ЦНИИМаш, 2007.
8. Девис П. Суперсила. — М.: Мир, 1989.
9. Маракушев А.А. Природа эндогенной активности Земли и других планет Солнечной системы // Сов. геология. — 1990. — № 8. — С. 3–15.
10. Сидоренков Н.С. Физика нестабильностей вращения Земли. — М.: Физмат, 2002.
11. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. — М.: Наука, 1993.
12. Федоров В.В. Единая теория поля. — СПб.: СПбГЭТУ, 1999.

© Волейшо В.О., 2015

Волейшо Владислав Оскарович // vlad.voleisho@yandex.ru

## ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 549.08:553.4

Якушина О.А. (ФГУП «ВИМС»), Ожогин Д.О. (ФГУП «ВСЕГЕИ», Московский филиал), Ожогина Е.Г. (ФГУП «ВИМС»)

### МОРФОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ РУД ЗОЛОТА МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ (МИКРО)ТОМОГРАФИИ

Статья посвящена изучению руд золота, в том числе дисперсного, неразрушающим методом рентгеновской (микро)томографии, который сегодня начал активно использоваться в числе лабораторных методов исследования. Приводятся экспериментальные результаты, обсуждаются специфические особенности методики для изучения. Показана применимость метода для морфоструктурного анализа. **Ключевые слова:** рентгеновская (микро)томография, методы исследования, морфоструктурный анализ, золото, дисперсное золото, руды, горные породы, минералы.

Yakushina O.A. (VIMS), Ozhogin D.O. (VSEGEI, Moscow branch), Ozhogina E.G. (VIMS)

#### X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY FOR MORPHOSTRUCTURAL ANALYSIS OF AU-BEARING ORES

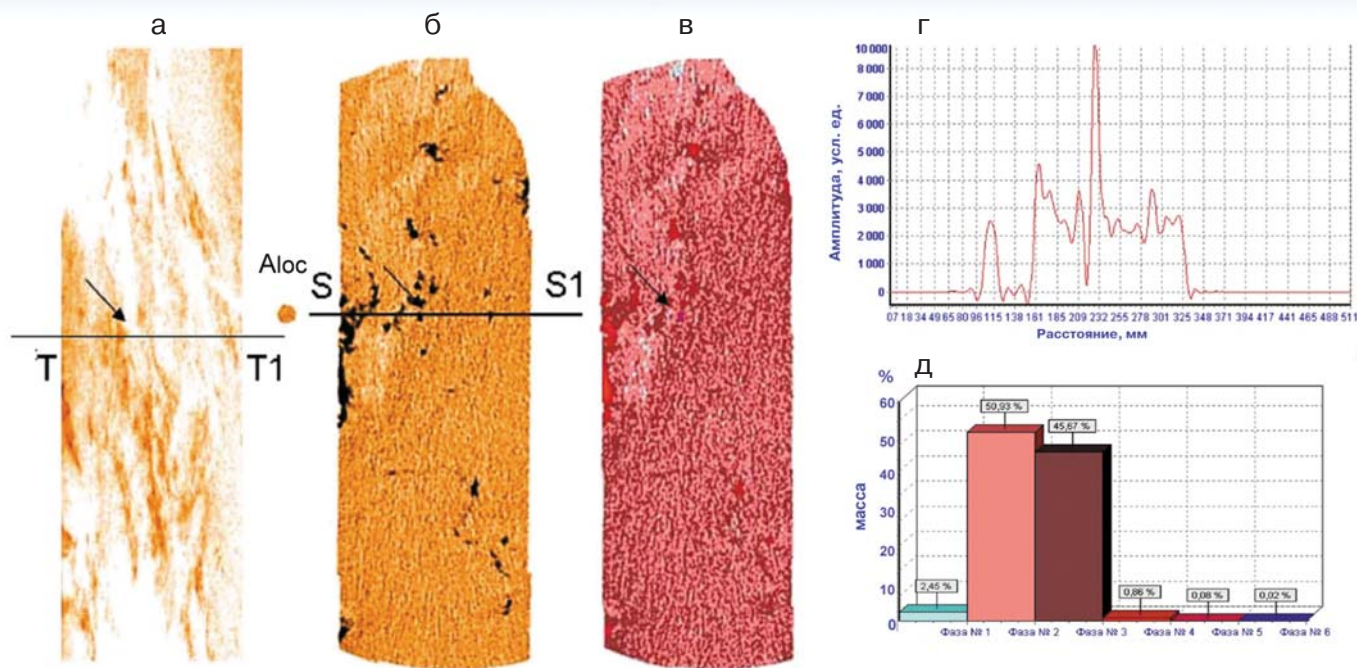
*Prospects of gold ores, gold, including disperse gold study by non-destructive X-ray (micro)tomography, which today has been actively used among laboratory physical methods. Experimental results and methodology specific features are discussed. The applicability of the method for morphostructural analysis is stated. Key words: X-ray computed tomography, laboratory methods, morphostructural analysis, gold, dispersed gold, ores rocks, minerals.*

В последние годы в мире и в нашей стране в числе лабораторных физических методов исследования вещества расширяется область использования метода вы-

числительной рентгеновской томографии (РТ), известного как метод интроскопии, дефектоскопии в промышленности для изучения внутреннего объема объекта без разрушения (сканирующее послойное просвечивание) [1–6]. Наиболее значимые успехи получило применение метода в медицине, и, логично, возникло желание использовать метод для исследования неорганических объектов, в том числе горных пород, руд и минералов; такие исследования начались еще в конце 1980-х годов за рубежом [5, 6] и в нашей стране [1, 3]. Высокое пространственное разрешение обеспечивают микрофокусные рентгеновские трубки разных серий и на образцах размером, как правило, менее 10 мм; это подчеркивают приставкой «микро» в названии метода ( $\mu$ СТ или High-resolution X-ray CT). В Бельгии в 2013 г. прошла первая международная конференция по «немедицинской» томографии.

Рентгеновская томография сочетает неdestructивность, простоту и оперативность анализа. Исследование проводится без пробоподготовки, при естественном состоянии руды, породы. Присутствие минералов с близкими оптическими характеристиками, тонкодисперсных или слабо окристаллизованных, рентгеноаморфных фаз не является ограничением РТ-анализа. Построение 3D моделей внутреннего строения без разрушения образца является безусловным преимуществом метода.

Однако горные породы, руды и минералы оказались сложным объектом для исследования этим методом. Причины этого как в физической природе явления (используется не монохроматическое излучение), конструкции приборов, так и в генетической природе минерального вещества — его полиминеральном (полифазовом) составе, присутствии минералов как



**Рис. 1.** РТ-анализ на примере золото-сульфидной руды: а — рентгенограмма, б — томограмма по сечению Т–Т1, в — обработка по «TomAnalysis», г — профиль ЛКО вдоль S–S1, д — соотношение фаз, %

непрерывных, так и дискретных изоморфных рядов, разных полиморфных и политипных модификаций, включений микро- и нанометрического размера, нередко высокой дисперсности рудо(породо)образующих минералов.

Сегодня есть два методических подхода к анализу томографических изображений: 1) стандартная оценка измерения плотности среды по шкале Хаунсфилда (НУ) — диапазон единиц шкалы по коэффициенту поглощения рентгеновского излучения нормальными анатомическими структурами организма составляет от  $-1024$  до  $+1024$ , ноль шкалы соответствует плотности воды; 2) нами было предложено использовать образец сравнения (алюминий, плотность которого наиболее близка к плотности силикатов и алюмосиликатов — основных минералов, слагающих земную кору, или медь — для золота и других тяжелых металлов): интерпретация проводится путем сопоставления экспериментальных и расчетных отношений линейного коэффициента ослабления рентгеновских лучей (ЛКО) определяемой фазы и образца сравнения (ОС).

Укажем, что последовательность проведения РТ-анализа была опробована и отработана на образцах полированных шлифов золото-сульфидных руд (рис. 1). Наблюдаемая в центре образца фаза с высоким значением ЛКО — частичка золота размером около 30 мкм внутри породы.

Очевидно, что руды благородных металлов, в том числе золота, и собственно золото как значительно поглощающий рентгеновские лучи элемент (массовый коэффициент  $\mu = 98,6 \text{ см}^{-1}$ ) на фоне породообразующих минералов считались наиболее простыми для рентгенотомографического исследования. Однако выяснилось, что в зависимости от размера частиц, пробности и физической плотности агрегатов золота

величина ЛКО варьирует в относительно широких пределах, а в случае «массивного» золота на изображениях возникают дополнительные рентгеновские тени — так называемые артефакты, искажающие картину распределения поглощения в исследуемом объекте. Оказалось, что эффективнее всего методом РТ можно изучать частицы золота микрометровых размеров, тонкодисперсное золото — его размеры, морфологию, объемное распределение в породе и кластерообразование.

Выбор технологии извлечения золота из руды определяется в том числе формой его нахождения, размерами и морфологией. Эти данные можно получить оперативно РТ-исследованием.

Высокая поглощающая способность золота обуславливает то, что его частицы четко фиксируются на томограммах как рентгеноконтрастное выделение (зерно) во вмещающей породе, сложенной обычно кварцем или алюмосиликатами, карбонатами. Свободное золото приурочено к межзерновому пространству и мелким трещинам в кварце и сульфидах. Оно также четко выделяется на фоне сульфидов (или сульфоарсенидов) металлов — главным образом пирита и арсенопирита. Аналогично тонкие частицы золота будут легко обнаружены в продуктах обогащения руд. Заметим, что наблюдаемые более низкие значения экспериментальных отношений ЛКО зерен золотосодержащих сульфидов, по сравнению с теоретически рассчитанными для зерен того же размера, можно объяснить тем, что исследуемые частицы не являются однородными как по составу, так и по строению.

Метод РТ успешно применен в комплексе методов минералогического анализа при исследовании золотосодержащих сульфидов (пирита и арсенопирита разных генераций) месторождений Сухой Лог (Иркут-

ская область), Маломырское и Албынское (Амурская область).

РТ имеет важное значение не только при изучении непосредственно золота, но и минералов, вмещающих его. Проблема упорного, невидимого золота, связанного в первую очередь с сульфидами (пиритом, халькопиритом, арсениопиритом), также в ряде случаев может решаться с привлечением данных РТ. За последнее десятилетие аппаратная база рентгеновских томографов была значительно усовершенствована (прежде всего за счет использования современных детекторов типа MediPix и микрофокусных рентгеновских трубок), и пространственное разрешение некоторых современных рентгеновских томографов составляет доли нанометра [7], однако укажем, что размер образца при анализе должен быть менее 1 мм. Это позволяет фиксировать золото микро-нанометровой размерности в руде и продуктах обогащения, устанавливать характер распределения, что дает возможность прогнозировать его поведение в процессах обогащения.

В прожилково-вкрапленных золото-сульфидных рудах месторождения Сухой Лог РТ-исследованием установлено пять минеральных фаз (рис. 2-I), из которых три относятся к породообразующим минералам (в основном это кварц — до 60–75 %); главный рудный минерал — пирит — составляет до 20–30 %, в нем в количестве до 0,04 % фиксируются сильнопоглощающие фазы размером менее 10 мкм, связанные с золотом (в пирите II генерации). Минералогическими исследованиями установлено, что пирит I генерации — сыпьевидный, пылевидный, сетчатый, глазковый. Электронно-микроскопическим анализом выявлены четко выраженные грани и ступени роста, тонкая параллельная зональность пиритоэдрических плоскостей и микродеформации микроструктурных элементов. При РТ анализе изображения томограмм дают такую же морфологию зерен пирита. Пирит II генерации присутствует в карбонатно-кварцевых линзовидно-прожилковых выделениях, приуроченных к контакту пород, образует гнездовидную вкрапленность. Кристаллы пирита имеют сложные кристалломорфологические формы (комбинация октаэдра и пентагон-додекаэдра) и сложное микростроение (изогнуто-ступенчатый, прерывисто-волнистый рисунок пирамид).

На томограммах прожилково-вкрапленных золото-сульфидных руд месторожде-

ния Маломырское (рис. 2-II) хорошо проявилось прожилковое, зональное строение рудных агрегатов, что определяет их текстурный рисунок. В руде фиксируется пять-восемь минеральных фаз, из которых две-три относятся к сульфидным минералам, и главные из них — пирит (до 4 %) и арсениопирит (до 1 %). Породообразующие фазы представлены кварцем (до 60–75 %), карбонатами (кальцит, доломит и сидерит — до 20–30 %), слоистыми алюмосиликатами (слюды — до 1 %). Сульфиды распределены по объему породы неравномерно. Это кристаллы (зерна) минералов и их сростания, причем все они имеют четкие границы и кристаллографические формы кубического габитуса. При этом размеры зерен арсениопирита меньше, чем у пирита — не более 100 мкм, и ориентированы они вдоль карбонатных прожилков. Пирит группируется гнездовидно и имеет размеры кристаллов до первых миллиметров. Рентгенотомографическое исследование отдельных зерен пирита выявило его микронеоднородность. Практически все зерна минерала имеют неровные очертания, их внутренняя неоднородность проявляется в наличии как областей повышенных ЛКО размером 30–50 мкм, что может быть связано с концентрированием в этих участках атомов тяжелых элементов (золота), так и пониженных значений ЛКО, возможно из-за включений карбонатов (сидерита).

Рентгеновская томография сегодня может быть использована для исследования геовещества, в том числе руд золота, либо с привлечением известных минералого-петрографических данных об объекте, либо в комплексе с оптической или электронной микроскопией. Метод РТ позволяет оперативно получать информацию

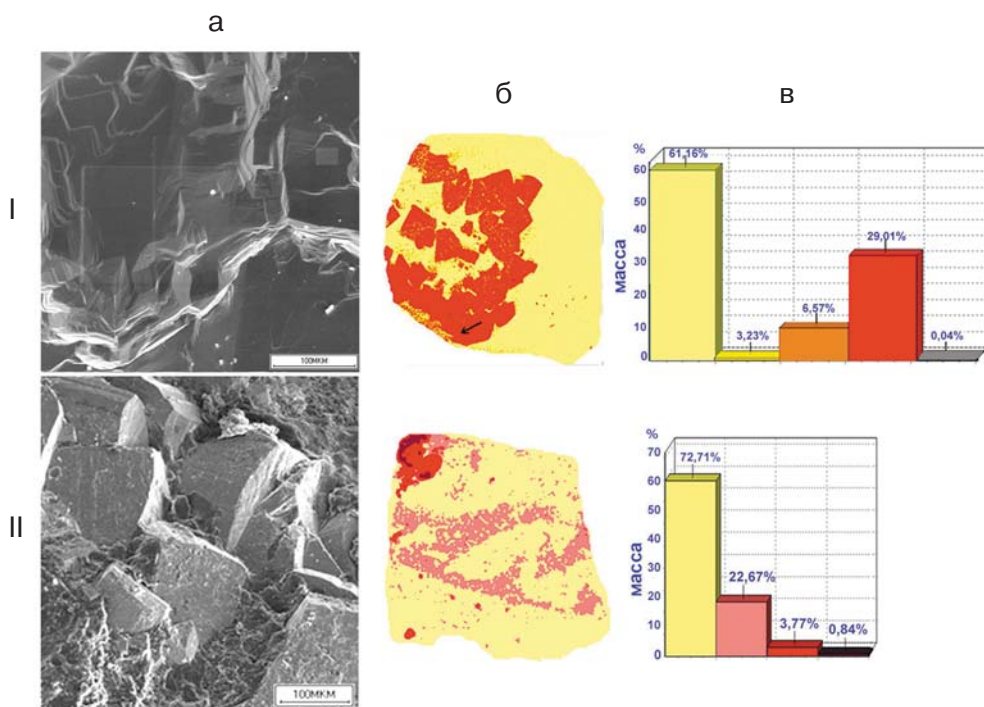


Рис. 2. РТ золото-сульфидной руды месторождений Сухой Лог (I) и Маломырское (II): а — РЭМ (увел. 10 мкм), б — рентгенотомограмма с разделением на фазы, в — соотношение фаз, %. Породообразующие минералы: кварц — желтое; карбонаты — лососевое (кальцит, доломит, анкерит) и оранжевое (сидерит); рудные минералы: пирит I генерации — красное, арсениопирит — коричневое, фаза золота — серое (показана стрелкой)

о морфологии выделений золота, гранулярном размере, характере локализации в породе (руде), взаимоотношении с минералами, его содержащими, а также прицельно выполнять последующие прецизионные анализы, сокращая время проведения исследований при изучении минерального вещества.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вайнберг Э.И., Хозяинов М.С. Вычислительная микротомография — новая информационная технология неразрушающего исследования внутренней микроструктуры образцов геологических пород // Геоинформатика. — 1992. — № 1. — С. 42–50.
2. Майорова Т.П., Стаценко Е.О., Трифонов А.А., Нестеренко Г.В. Рентгеновская микротомография и автоэмиссионная электронная микроскопия — новые возможности изучения высокодисперсных золотых руд // Вестник института геологии Коми НЦ УрО РАН. — 2013. — № 11. — С. 34–38.
3. Хозяинов М.С., Руб А.К., Козорезов Е.В. Использование рентгеновской вычислительной микротомографии в прикладной минералогии // ДАН. — 1995. — Т. 344. — № 4. — С. 516–519.
4. Якушина О.А., Ожогина Е.Г., Хозяинов М.С. Рентгеновская вычислительная микротомография — неразрушающий метод структурного и фазового анализа // Мир измерений. — 2003. — № 10(32). — С. 12–17.
5. Ketcham R.A., Carlson W.D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: Applications to the geosciences // Computers and Geosciences, — 2001. — V. 27. — P. 381–400. — URL: <http://www.citlab.geo.utexas.edu/>
6. Carlson W.D. Three-dimensional imaging of earth and planetary materials // Earth and Planetary Science Letters. — 2006. — V. 249. — P. 133–147.
7. Cnudde V., Boone M.N. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: a review of the current technology and applications // Earth-Science Reviews / Elsevier. — 2013. — V. 123. — N 8. — P. 1–17.

© Якушина О.А., Ожогин Д.О., Ожогина Е.Г., 2015

Якушина Ольга Александровна // yak\_oa@mail.ru  
Ожогин Денис Олегович // ozhogindenis@yandex.ru  
Ожогина Елена Германовна // vims\_ozhogina@mail.ru

УДК 553.493.53, 622.772.

Петкевич-Сочнов Д.Г. (ФГУП «ВИМС»)

#### МАЛООТХОДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБОГАЩЕНИЯ РУДНЫХ ПЕСКОВ КАМБУЛАТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

*Рассматривается впервые проведенное изучение технологических свойств титано-циркониевых россыпей Камбулатского месторождения. В ходе геолого-технологического картирования и составления технологического регламента изучен вещественный состав, определены продуктивный класс и технологический тип руды, разработана технология обогащения, позволяющая получать 4 товарных концентрата. Составлена технологическая часть в технико-экономическое обоснование временных разведочных кондиций. **Ключевые слова:** титаноциркониевая россыпь, технология обогащения, гравитационное обогащение, магнитная сепарация, электростатическая сепарация, малоотходная технология.*

Petkevich-Sochnov D.G. (VIMS)

LOW-WASTE TECHNOLOGY OF ENRICHMENT OF ORE SAND OF THE KAMBULATSKY FIELD

*Is considered the first study conducted technological properties Kambulatsky titanium-placer deposits. In the course of geological and technological mapping and compilation of production schedules studied material composition, defined class pro-*

*ductive and technological type of ore, developed enrichment technology, allows you to receive 4 commercial concentrate. Compiled technological part in a feasibility study of temporary exploration conditions. **Key words:** titanium placer, concentration technology, gravity separation, magnetic separation, electrostatic separation, low-waste technology.*

Объектом исследований явилось Камбулатское россыпное месторождение титано-циркониевых песков, расположенное в пределах Правобережного россыпного поля Ставропольского россыпного района.

Известно, что извлечение полезных компонентов из россыпей, в том числе титано-циркониевых, зависит от обогатимости руд и применяемой технологической схемы. Для того, чтобы месторождение смогло заинтересовать горнодобывающую промышленность необходимо разработать такую технологию обогащения, которая при минимальных затратах обеспечивала бы наиболее полное извлечение полезных компонентов, оказывая к тому же минимальное отрицательное воздействие на окружающую среду.

Оценка технологических свойств рудных песков Камбулатского участка ранее не проводилась, хотя в рамках разработки технико-экономического обоснования (ТЭО) разведочных кондиций технологичность сырья является одним из важнейших показателей.

Разработка оптимальной технологической схемы обогащения рудных песков Камбулатской россыпи проводилась в два этапа. Первоначально было выполнено геолого-технологическое картирование (ГТК), на основании которого определены технологические сорта и типы руд месторождения и разработана принципиальная технологическая схема переработки, обеспечивающая рациональное и комплексное использование полезного ископаемого. Затем, с учетом результатов ГТК на укрупненной пробе разработан технологический регламент обогащения рудоносных песков.

Работы по ГТК на Камбулатском месторождении ранее не проводились, нами оно проведено по результатам технологических экспериментов с обогащением двадцати лабораторных малых технологических проб (ЛМТП). Аналогичные работы ранее были выполнены на Бешпагирском эталонном объекте Е.Н. Левченко (ФГУП «ИМГРЭ»).

Исходные пески ЛМТП Камбулатского месторождения в целом характеризуются низкими содержаниями полезных компонентов, в %:  $TiO_2$  варьирует в пределах от 0.55 до 2.31 при среднем значении 1.15;  $ZrO_2$  — от 0.09 до 0.44 при среднем значении 0.19, поэтому эти рудные пески можно отнести к бедным.

Изучение минерального состава черных шлихов (минералогические исследования выполнены Кривоконевой Г.К., ФГУП «ВИМС»), выделенных из исходных песков ЛМТП, показало, что в тяжелой фракции наблюдается следующее распределение основных минералов, в %: циркон — от 9.0 до 22.0; рутил + анатаз — от 9.5 до 15.5; ильменит + псевдорутит + вторичные оксиды титана — от 32.5 до 52.0; кианит + силлиманит — от 8.0 до 18.0.

Гранулометрический состав титано-циркониевых песков, а также особенности распределения полезных