

3. Моисеев, Б.М. Образование Al- и E-центров в кварцах под действием природного облучения / Б.М. Моисеев, Л.Т. Раков // ДАН СССР — 1975. — Т. 223. — № 5. — С. 1215–1217.
4. Патент РФ № 2432569. Способ экспрессного обнаружения высококачественного кварцевого сырья / Н.Н. Борозновская, Н.Г. Быдтаева, А.В. Климин; патентообладатель — ГОУВПО ТГУ; опубл. 27.10.2011.
5. Патент РФ № 2145105. Способ поиска месторождений особо чистого кварца / Б.М. Моисеев, Л.Т. Раков, О.Д. Ставров; патентообладатель — ФГБУ «ВИМС»; опубл. 27.01.2000.
6. Раков, Л.Т. Концентрирование главных примесей как основа технологий высокой очистки кварца / Л.Т. Раков, Л.А. Данилевская, Л.С. Скамницкая, В.Т. Дубинчук / Научные основы и современные процессы комплексной переработки труднообогатимого минерального сырья (Плаксинские чтения 2010): Матер. междунар. совещания. — Казань, 2010. — С. 77–80.
7. Раков, Л.Т. Подвижные примеси в кварце Карело-Кольского региона / Л.Т. Раков, В.Т. Дубинчук, Л.С. Скамницкая, В.В. Щипцов // Тр. Карельского научного центра РАН. Серия Геология докембрия. — Петрозаводск, 2016. — № 10. — С. 100–118.
8. Раков, Л.Т. Типоморфное значение однопиковых Ti-центров в кварце / Л.Т. Раков, К.А. Кувшинова, Б.М. Моисеев, М.А. Плескова, М.Н. Кандинов // ДАН СССР — 1989. — Т. 305. — № 1. — С. 192–194.
9. Раков, Л.Т. Исследование методом ЭПР Ge-центров в природном поликристаллическом кварце / Л.Т. Раков, Н.Д. Миловидова, К.А. Кувшинова, Б.М. Моисеев // Геохимия. — 1985. — № 9. — С. 1339–1344.
10. Раков, Л.Т. Новый метод оценки качества кварцевого сырья / Л.Т. Раков, Н.Д. Миловидова, Б.М. Моисеев, В.Г. Огурцов // Разведка и охрана недр. — 1993. — № 7. — С. 36–38.

© Коллектив авторов, 2018

Скамницкая Любовь Степановна // skamnits@krc.karelia.ru
 Раков Леонид Тихонович // rakovlt@mail.ru
 Дубинчук Виктор Тимофеевич // Vic_dubinchuk@mail.ru
 Бубнова Татьяна Петровна // bubnova@krc.karelia.ru

УДК 549.08:550.8

Якушина О.А.^{1,2}, Ожогина Е.Г.¹, Хозяинов М.С.² (1 — ФГБУ «ВИМС», 2 — ГБОУ ВО «Университет Дубна»)

МОРФОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МИНЕРАЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА: МЕТОД РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Обсуждаются возможности рентгеновской (микро)томографии для морфоструктурного анализа при решении задач технологической минералогии в комплексе современных физических методов исследования. Метод позволяет получать информацию о текстурно-структурных характеристиках, пористости, гранулярном и минеральном составе, давать прогнозную оценку качества твердых полезных ископаемых. Приводятся экспериментальные данные использования рентгеновской (микро)томографии для морфоструктурного анализа минерального сырья. **Ключевые слова:** технологическая минералогия, минералы, руды, горные породы, минеральный состав, морфоструктурные характеристики, рентгеновская микротомография.

Yakushina O.A.^{1,2}, Ozhogina E.G.¹, Khozyainov M.S.² (1 — VIMS, 2 — Dubna University)

MORPHOSTRUCTURAL ANALYSIS OF MINERAL SUBSTANCE: X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY

Prospects of X-ray Computed (micro) Tomography for morphostructural analysis in the field of technological mineralogy studies are discussed. The method is used when solving applied

tasks in a complex of modern laboratory physical testing methods of mineral raw materials to obtain data on mineral composition, texture, granules morphology, porosity volume; to separate ore and rock-forming minerals, and the quality prognosis. Morphostructural peculiarities in quantitative estimation may be obtained by XCT fast non-destructive testing as the basis for preliminary raw mineral matter quality evaluation. **Keywords:** technological mineralogy, minerals, ores, rocks, mineral composition, morphostructural characteristics, X-ray CT.

Качество минерального сырья определяется не только содержанием ценных компонентов, но и его морфоструктурными характеристиками: минеральным (фазовым) составом, текстурой и структурой (размеры, морфология зерен минералов и агрегатов), которые отражают характер взаимоотношений рудных и нерудных минералов, их реальный химический состав и строение; размер и форму зерен, характер срастаний. Разработка или выбор технологии переработки минерального сырья также основываются на данных о вещественном составе и особенностях строения минеральных агрегатов. Гранулярный состав и морфометрические характеристики минералов в значительной степени определяют выбор технологической схемы обогащения и прогнозирование технологических показателей — количество стадий и крупность дробления руды или породы, возможность получения отвальных хвостов, а также потерь в хвостах за счет неполного раскрытия минералов, эффективность раскрытия рудообразующих минералов, т.е. глубину обогащения.

В промышленную переработку все больше вовлекаются низкокачественные руды полиминерального состава и отходы горнопромышленных производств [1, 2]. Рудные минералы в них имеют достаточно сложные морфоструктурные характеристики, у них могут быть близкие физические свойства. Полезный элемент может присутствовать одновременно в нескольких минералах, тесно ассоциирующих как между собой, так и с другими рудообразующими минералами. Перечисленное создает ряд методических трудностей в диагностике, негативно влияет на раскрытие полезных минералов в процессе дезинтеграции руды, поэтому тем более важно наиболее полно, достоверно, количественно устанавливать ее минеральный и гранулярный состав. Такое минеральное сырье требует изучения тонких деталей строения наряду с диагностикой минеральных фаз и определением реального состава и строения минеральных агрегатов.

Метод исследования. Рентгеновскую (микро)томографию (μPT) начали использовать с 1990-х годов для исследования твердых полезных ископаемых и пород-коллекторов [3–5] ввиду ряда преимуществ метода: неdestructивности, отсутствия процедуры подготовки пробы к анализу, индифферентности ряду ограниченной диагностики ввиду близости физических свойств, например, оптических констант минералов, или присутствия в них тонкодисперсных и аморфных минералов и их агрегатов. Известно, что величина линейного

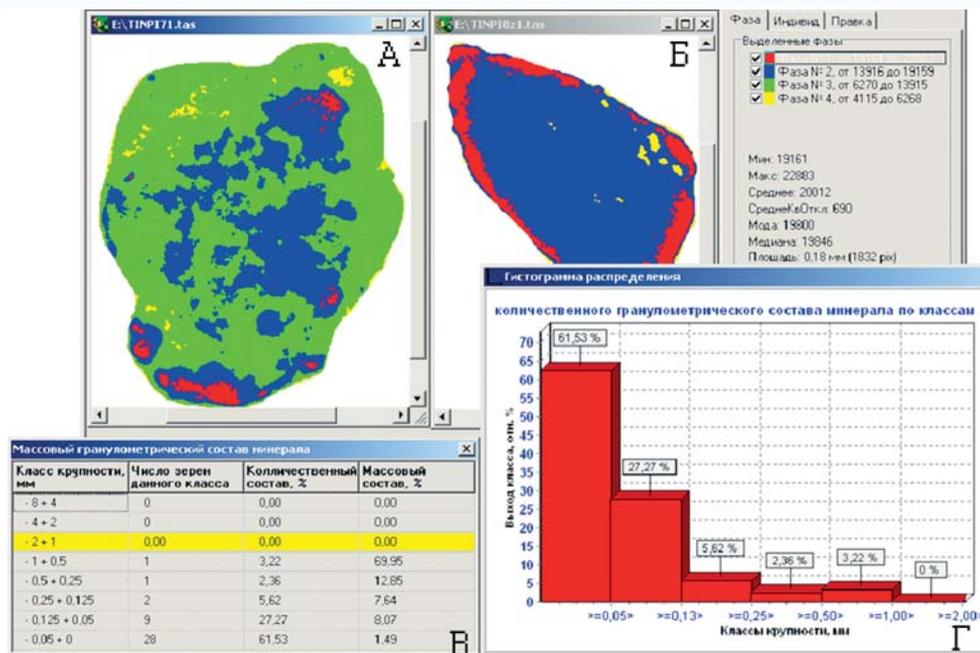


Рис. 1. Карбонатная марганцевая руда Тынынского месторождения: агрегат карбонатно-глинистого (А) и агрегат существенно родохрозитового состава (Б), распределение родохрозита по классам крупности, таблица, в мм (В) и гистограмма, в % (Г). Родохрозит — синее и красное; слоистые алюмосиликаты — зеленое, опал — желтое

коэффициента ослабления рентгеновского излучения (ЛКО) $\mu \text{ см}^{-1}$ определяется химическим составом и плотностью вещества для данной энергии γ -излучения. Изображения томограмм, плоскостные и трехмерные, отображают изменяющиеся значения ЛКО вещества, визуализируя характер распределения фаз и пустотное пространство в тонком плоском слое исследуемого объекта. Установленные экспериментальные значения ЛКО позволяют получать количественные данные о морфоструктурных особенностях (морфометрические характеристики, гранулярный состав, распределение элементов и минералов (фаз), включений) и пустотном пространстве (пористость, трещиноватость, кавернозность), по которым можно прогнозировать свойства сырья и его поведение в процессах переработки, а также потери в хвостах за счет неполного раскрытия минералов. Эффективность РТ анализа зависит как от характеристик прибора (источника рентгеновского излучения, вида, материала детектора, пространственного разрешения), так и алгоритмов расчета. Высокое пространственное разрешение обеспечивают микрофокусные рентгеновские трубки, что указывает приставкой «микро» в названии метода — $\mu\text{СТ}$, High-resolution XСТ. Следует отметить, что горные породы и минералы оказались достаточно сложным объектом для $\mu\text{РТ}$ в отличие от биологических и медицинских образцов; причины этого в физической природе явления, конструкции приборов и в генетической природе минерального вещества: поликомпонентном и изменчи-

проводят по оригинальной методике [4] (при измерениях ЛКО используется образец сравнения — алюминий, т.к. его плотность наиболее близка к плотности

вом (явления изоморфизма, полиморфизма, микропримеси) фазовом составе, микровключениях других фаз. Тонкодисперсные выделения по своим размерам и изрезанности границ зерен ближе к идеальной форме сферы (точки), чем разноразмерные, неизометричные зерна минералов и их агрегаты. В этом случае проще выполнять математические расчеты для построения изображений томограмм и разделение объектов неоднородности на минеральные фазы и их диагностику, что повышает достоверность интерпретации результатов исследования.

Морфоструктурное исследование (морфология, гранулярный состав, содержание выделенных фаз)

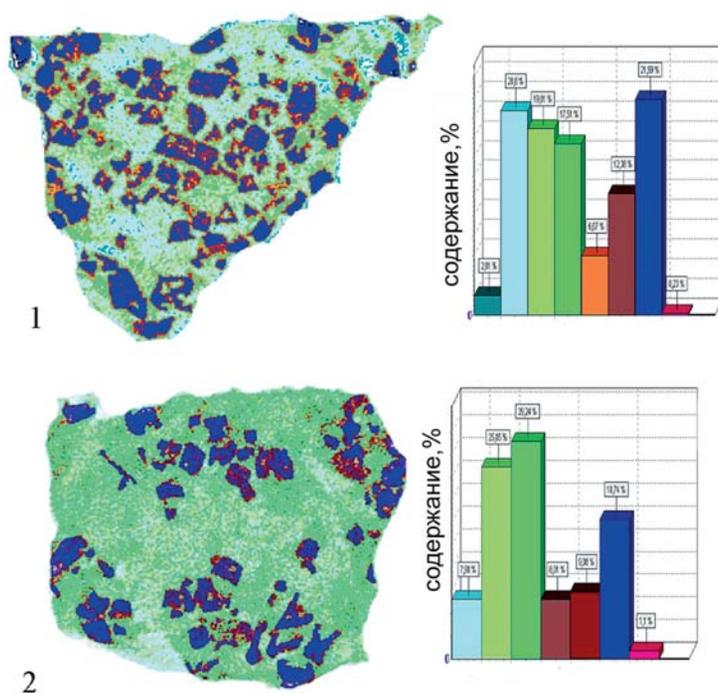


Рис. 2. Титаномагнетитовая руда Пудожгорского месторождения рудного (1) и подрудного (2) горизонта, размер обломков около 10x10 мм, $\mu\text{РТ}$; слева направо: сегментация томограммы и содержание выделенных фаз, в %. Породообразующие минералы: шпидель — голубое, слюды — сине-зеленое, пироксены — светло-зеленое, амфиболы — зеленое, сфен — оранжевое, рудные минералы: ульвошпидель и ильменит — кирпичное, титаномагнетит-1 — синее, титаномагнетит-2 — малиновое

силикатов и алюмосиликатов — основных породообразующих минералов) путем линейного и площадного анализов изображений томограмм на основе построения гистограмм частотного распределения амплитуды ЛКО. Известные данные позволяют повысить надежность идентификации фаз и морфоструктурных особенностей. Расчет осуществляется в предположении, что химический состав и плотность идентифицируемой фазы известны. Близость отношений измеренных амплитуд и рассчитанных величин ЛКО для идентифицируемой фазы и образца сравнения с большой степенью вероятности свидетельствует о правильности предположения относительно минерального состава диагностируемых фаз. Применяемый методический прием позволяет сопоставлять измерения, проведенные при разных режимах съемки, для идентифицируемых фаз разных размеров при меняющемся минеральном составе вмещающей среды (горной породы, минерального агрегата) — «геологическом фоне» образцов.

Морфоструктурные исследования методом рентгеновской (микротомографии). Метод μ РТ используется для исследований разных видов твердых полезных ископаемых [2–5]. Экспериментальные исследования проводились на отечественном рентгеновском микротомографе ВТ-50-1 (стандарт ASTM E1441-11), адаптированном для решения геологических задач. Рабочее напряжение источника рентгеновского излучения $U=100$ кВ, $I=2,9$ А; блок детекторов 8 каналов со сцинтилляторами CsI(Na), рабочее поле: $1,6 \times 8$ см.

Рентгеномографическое исследование карбонатных марганцевых руд Тыньинского месторождения осадочного генезиса было выполнено с целью получения данных о фазовом и гранулярном составе руд, морфологии индивидов и раскрытии зерен рудных минералов. На примере агрегатов карбонатно-глинистого состава (существенно родохрозитового состава) приведен пример морфострук-

турных данных (рис. 1): μ РТ выделено две разновидности родохрозита; породообразующие минералы представлены слоистыми алюмосиликатами и опалом. При дезинтеграции руды будут образовываться полиминеральные агрегаты с варьирующим содержа-

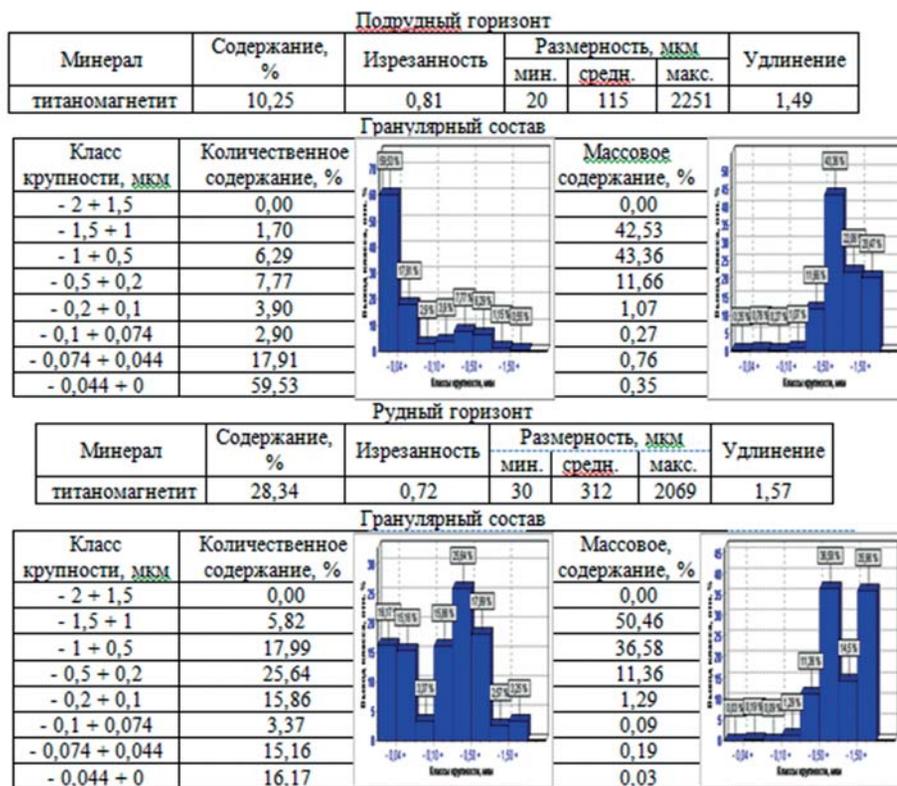


Рис. 3. Количественный и массовый гранулярный состав титаномагнетита Пудожгорского месторождения из рудного и подрудного горизонта по данным μ РТ

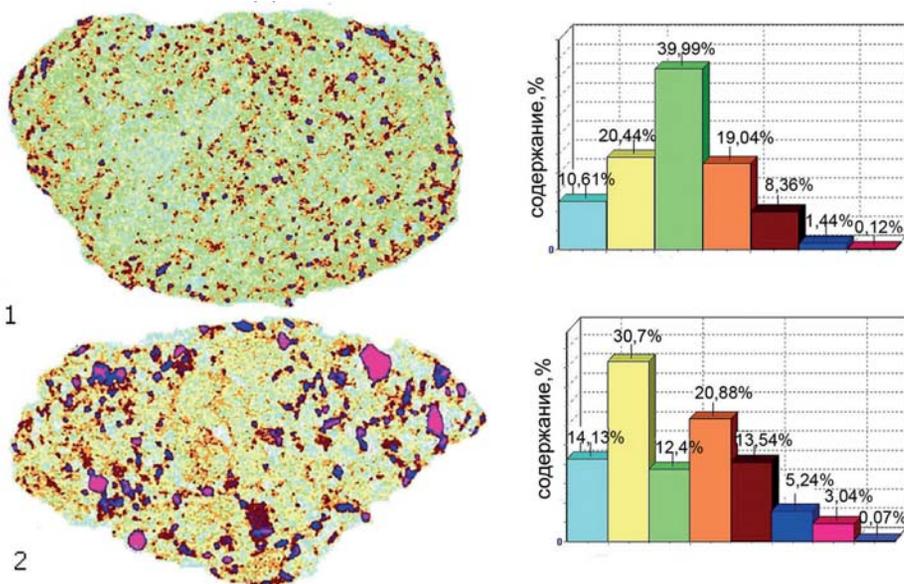


Рис. 4. Морфоструктурные особенности лежалых хвостов обогащения из зоны пляжа (1) и пруда-отстойника (2), размер обломков $1 \times 1,5$ см; μ РТ, слева направо: сегментация томограммы и содержание выделенных фаз, в %. Слоистые алюмосиликаты — голубое, кварц — желтое, полевые шпаты и карбонаты — зеленое, гидроксиды железа (гетит) — оранжевое, гематит — коричневое, магнетит-2 — синее, магнетит-1 — малиновое

нием минералов — карбонатов, слоистых алюмосиликатов и реже опала. Поэтому даже тонкое измельчение материала не позволит получить полное раскрытие зерен родохрозита, который сосредоточен в тонких классах крупности.

При изучении титаномагнетитовых руд Пудожгорского месторождения данные μ РТ показали, что руда сформирована тонковкрапленными равномерно распределенными агрегатами титаномагнетита со средним размером $\sim 0,05$ мм. На томограммах (рис. 2) отчетливо видно, что титаномагнетит представлен магнетит-ильменитовыми срастаниями с включениями 3–4 нерудных минералов. Титаномагнетит преобладает в относительно крупных фракциях $-1,5+0,5$ мм, это позволяет предположить отсутствие при обогащении существенных потерь титаномагнетита в тонких классах в виде сростков с нерудными минералами. Установлен массовый гранулярный состав титаномагнетита (рис. 3).

Примером техногенного минерального сырья являются горнопромышленные отходы, например, лежащие отвальные хвосты железорудной фабрики, которые представлены отложениями пляжной зоны (рыхлый песчаноглинистый материал) и пруда-отстойника (плотные илстые образования). Главным полезным элементом по данным химического анализа является железо, его содержание составляет 27,7–30,4 %, поэтому рассматривалась возможность его вторичного извлечения. На томограммах (рис. 4) четко выделяются рудная и нерудная составляющая, массовое содержание последней преобладает. Сходство по данным μ РТ минерального состава и текстурно-структурного рисунка обеих проб позволяет дать прогноз, что возможна совместная переработка лежалых хвостов пляжной зоны и пруда-отстойника физическими методами.

Заключение

Практика минералогических исследований в ВИМСе показала, что рентгеновская томография позволяет решать вопросы прогнозной оценки качества минерального сырья, контроля за ходом процессов обогащения и др. Проведены исследования, показавшие возможность применения томографа как средства разделения для экспрессной разбраковки кусков с рудной минерализацией от пустой породы — разделения рудного и нерудного материала в процессе обогащения минерального сырья.

Рентгеновской (микро)томографией можно исследовать минеральное сырье природного и техногенного происхождения с разным диапазоном рентгеноконтрастности составляющих фаз, отбирать информативные образцы для дальнейших прецизионных анализов, сокращая сроки и объемы лабораторных работ, уменьшая этим общие затраты на исследования. Метод позволяет получать оперативную информацию о минеральном (фазовом) составе, определять основные морфометрические и гранулярные характеристики минералов, и давать прогнозную оценку минерально-го сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ожогина, Е.Г. Горнопромышленные отходы: минералогические особенности / Е.Г. Ожогина, О.Б. Котова, О.А. Якушина // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. — 2018. — № 6. — С. 43–49. DOI: 10.19110/2221-1381-2018-6-43-49.
2. Ожогина, Е.Г. Минералогические особенности металлургических никельсодержащих шлаков и перспективы их вторичного использования / Е.Г. Ожогина, О.А. Якушина, А.П. Козлов А.П. // Обогащение руд. — 2017. — № 3 (369). — С. 49–56.
3. Сорокин, Е.М. Минералого-технологические особенности железных руд Серовского месторождения / Е.М. Сорокин, Ю.М. Астахова, И.Г. Быстров, М.В. Иванова и др. // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. — 2015. — № 1. — С. 18–23.
4. Хозяинов, М.С. Использование рентгеновской вычислительной микротомографии в прикладной минералогии / М.С. Хозяинов, А.К. Руб, Е.В. Козорезов // Доклады Академии наук. — 1995. — № 4. — С. 516–519.
5. Snudde, V. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: a review of the current technology and applications / V. Snudde, M.N. Boone // Earth-Science Reviews / Elsevier, 2013. — Vol. 123, August 2013. — PP. 1–17. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.04.003.

© Якушина О.А., Ожогина Е.Г., Хозяинов М.С., 2018

Якушина Ольга Александровна // yak_oa@mail.ru
Ожогина Елена Германовна // vims_ozhogina@mail.ru
Хозяинов Михаил Самойлович // mkhoz@mail.ru

УДК 549.08:535.34

**Рассулов В.А., Леденева Н.В., Иоспа А.В.
(ФГБУ «ВИМС»)**

ОПЕРАТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА ГЛИНИСТО-ГИДРОСЛЮДИСТОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ СПЕКТРОМЕТРИИ В ДИАПАЗОНЕ UV-VIS-NIR

*Проведенные исследования представительной выборки образцов керна с уранового месторождения Столбовое (Россия) показали высокую степень надежной идентификации минералов слюдистых (мусковит, фенгит, паргонит, серицит, иллит) и глинистых (каолинит, монтмориллонит) групп, карбонатов и хлоритов методом UV-Vis-NIR-спектроскопии, что позволяет оперативно картировать околорудные эпигенетические изменения пород при проведении геологоразведочных работ и технологическом картировании месторождений. **Ключевые слова:** UV-Vis-NIR-спектроскопия, глинисто-слюдистая минерализация, идентификация, картирование, геологоразведочные работы.*

Rassulov V.A., Ledeneva N.V., Iospa A.V. (VIMS)

RAPID DIAGNOSIS CLAY-HYDROLOGIST MINERALIZATION BASED ON SPECTROMETRY IN THE RANGE UV-VIS-NIR

The conducted studies of a representative sample of core samples of the Stolbovoye uranium deposit (Russia) showed a high degree of reliable identification of micaceous minerals (muscovite, phenygit, paragonite, sericite, illite) and clay (kaolinite, montmorillonite) groups, siderite and chlorite by the UV-Vis-NIR- spectrometry, which allows you to quickly map epigenetic changes in rocks during geological exploration