

Таким образом, исследования и испытания противогололедных реагентов являются важной задачей, необходимой для решения проблем эффективной борьбы с зимней скользкостью на автомобильных дорогах, и предотвращением проникновения на рынок контрафактной продукции, чье применение способно повлечь за собой риск не только транспортного коллапса, но и аварий с трагическими последствиями.

Безусловно, исследователям необходимо не только проводить научные контрольные мероприятия, но и разрабатывать новые рецептуры противогололедных реагентов, в том числе содержащих фрикционные компоненты на основе различных типов минералов и минерального сырья, повышая их качество, эффективность и экологическую безопасность — важнейшие составные части наступающего в мире VI технологического уклада.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеева, Л.И. Транспорт и связь в России. Статистический сборник. / Л.И. Агеева и др. — М.: Росстат, 2012. — 304 с.
2. Булатицкий, К.К. Применение современных аналитических методов для оценки экологического влияния противогололедных реагентов на объекты окружающей среды / К.К. Булатицкий и др. // Российский химический журнал. — 2014. — Т. LVIII. — № 1. — С. 65–72.
3. ГОСТ 33181-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к уровню зимнего содержания.
4. Глушко, А.Н. Разработка CALS-системы компьютерного менеджмента качества пропиточных составов для дорожных покрытий / А.Н. Глушко, А.М. Бессарабов // Изв. Московского государственного технического университета МАМИ. — 2013. — Т. 2. — № 3. — С. 91–94.
5. Гранит на асфальте: плюсы и минусы скандинавского опыта. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: //ntv.ru. URL: <http://www.ntv.ru/novosti/269360/>.
6. Об утверждении технологии зимней уборки проезжей части магистралей, улиц, проездов и площадей (объектов дорожного хозяйства г. Москвы) с применением противогололедных реагентов и гранитного щебня фракции 2–5 мм (на зимние периоды с 2010–2011 гг. и далее): Распоряжение Правительства Москвы от 28 сентября 2011 г. N 05-14-650/1 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.teh-stroy.ru/uborka-snega.php>.
7. Требования к противогололедным материалам, утвержденные Распоряжением Минтранса России № ОС-548-р от 16.06.2003 г. — С. 6.

© Глушко А.Н., Голосова Н.А., Ретивов В.М., 2018

Глушко Андрей Николаевич // ang@irea.org.ru
Голосова Надежда Андреевна // wanze@bk.ru
Ретивов Василий Михайлович // vasilii_retivov@mail.ru

УДК: 550.847

Скамницкая Л.С.¹, Раков Л.Т.², Дубинчук В.Т.³, Бубнова Т.П.¹ (1 — Институт геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск, 2 — ИГЕМ РАН, 3 — ФГБУ «ВИМС»)

МЕТОД ОПЕРЕЖАЮЩЕЙ ДИАГНОСТИКИ ОБОГАТИМОСТИ КВАРЦА

Разработан новый метод диагностики обогатимости кварцевого сырья, включающий в себя определение исходного содержания в кварце изоморфных примесей методом ЭПР и оценку возможностей внедрения рассеянных примесей в кристаллическую структуру минерала при тех-

*нологическом переделе. Для получения кварцевых концентратов с минимальными содержаниями изоморфных примесей предлагается подвергать их воздействию СВЧ-излучения. Метод дает возможность установить предел обогатимости кварцевого сырья и определить основные режимы его обогащения. **Ключевые слова:** кварц, изоморфные примеси, метод ЭПР, обогащение кварца.*

Skamnitckaya L.S.¹, Rakov L.T.², Dubinchuk V.T.³, Bubnova T.P.¹ (1 — Institute of Geology, Karelian Research Centre, RAS, 2 — IGEM RAS, 3 — VIMS)

DIAGNOSTIC METHOD OF QUARTZ ENRICHMENT

*New diagnostic method of enrichment of quartz raw materials, including the definition of the initial content in quartz is isomorphic impurities and assessment of possibilities for introduction of trace impurities in the crystalline structure of the mineral technology redistribution was developed. Expose quartz concentrates to microwave radiation was proposed for receiving product with a minimum content of isomorphic impurities. The method can be used for definition of a limit of enrichment of quartz raw materials and finding of the main modes of technological processing. **Keywords:** quartz, impurities, method EPR, enrichment of quartz.*

Особо чистый кварц является кварцевым сырьем, пригодным для получения различными технологиями обогащения высококачественных концентратов, отвечающих современным требованиям к чистоте, предъявляемым отечественной промышленностью и соответствующих мировому уровню. Рост потребления особо чистого кварца обусловлен развитием высоких технологий в электронной, химической, космической и других отраслях промышленности. Направления использования кварца определяются формой вхождения различных примесей. Современные технологии позволяют практически полностью удалять пленочные, минеральные и ГЖВ примеси. Однако получение высококачественных кварцевых концентратов в значительной степени определяется возможностью удаления из кварца в процессе его обогащения целого ряда структурных (изоморфных) примесей.

Наиболее распространенными структурными примесями в кварце являются атомы Al, Ti, Ge и др., изоморфно замещающие в кристаллической решетке минерала атомы кремния. Образование изоморфных примесей связано с процессами кристаллизации и последующей динамической рекристаллизации кварца в природе. Отличительная особенность изоморфных примесей заключается в том, что их практически невозможно удалить способами традиционных технологий обогащения кварца. При этом наличие примесных атомов в кварце в виде изоморфных примесей или в составе более сложных структурных дефектов влияет на оптические свойства, растворимость, температуру плавления и другие физико-химические свойства минерала, которые, в конечном итоге, обуславливают технологичность и специализацию кварцевого сырья.

Обогащение кварца структурными примесями может происходить и в процессе технологического передела кварцевого сырья. В известной мере это явление носит неизбежный характер, т.к. в кварце в значительных количествах присутствуют рассеянные примеси. Они представляют собой атомы различных элементов, занимающие неструктурное положение в зонах дефектности кварца. Рассеянные примеси могут захватываться дефектами кристаллической структуры, адсорбироваться на внутренней поверхности кварца, концентрироваться в газовой-жидких включениях, образовывать отдельные молекулы в вакуолях. При термическом воздействии они покидают места своей локализации и начинают диффундировать в кварце. Результатом такой диффузии становится проникновение рассеянных примесей из зон дефектности в области совершенной кристаллической структуры, где они занимают вакантные места в кристаллической решетке минерала.

Такое развитие событий крайне нежелательно для технологии обогащения кварца, т.к. после перехода рассеянных примесей в изоморфную форму они становятся недоступными для извлечения. Между тем высокотемпературная обработка широко используется в процессах очистки кварца, и ее влияние на эффективность обогащения необходимо учитывать.

Кроме того, следует помнить, что количество структурных примесей различных элементов в кварце неодинаково. По-разному они входят в кристаллическую структуру кварца и при отжиге. Из общего количества внедренных при термообработке примесей основная доля (свыше 95 %) приходится на алюминий. Ввиду этого при диагностике обогатимости кварца примеси Al должно уделяться основное внимание.

Необходимость учета структурных примесей в опережающей диагностике обогатимости кварцевого сырья отмечалась неоднократно. Подчеркивалось, что их содержание определяет предельную обогатимость кварца после удаления из него всех других примесей [10]. Для оценки концентраций структурных примесей в кварце предлагалось использовать различные методы. Одним из них является метод термолюминесценции (ТЛ), который был рекомендован для определения степени дефектности кристаллической структуры кварца, отражающей, по мнению авторов, качество кварцевого сырья [4]. Однако такая связь не была доказана, как и не была до конца установлена природа полос ТЛ, используемых в методе. По тем же причинам не может считаться обоснованным и способ оценки качества кварца по данным изучения его методом ТЛ при низких температурах [1].

Более убедительным представляется способ выявления особо чистого кварца по результатам анализа его спектральным количественным методом [5]. Его авторами была установлена закономерность, заключающаяся в том, что в кварцах пегматитовых и кварцевых жил концентрация лития уменьшается с уменьшением содержания в кварце структурной примеси алюминия. Причем концентрация лития 0,5 г/т отвечает содержа-

нию в кварце структурного алюминия 20 г/т, соответствующего максимально допустимому загрязнению этой примесью особо чистого кварца. Это значение содержания лития и было выбрано в качестве показателя кварца особой чистоты.

В то же время надо признать, что способ оценки обогатимости кварца по значениям содержания лития является опосредованным. Он основан на допущении, что все ионы Li^+ , присутствующие в особо чистом кварце, играют роль компенсаторов заряда изоморфных ионов Al^{3+} . Но данное предположение не всегда отражает реальную картину, т.к. Li может входить в состав других структурных дефектов или микроскопических минеральных включений. Поэтому прямым и наиболее точным способом опережающей диагностики обогатимости кварца остается анализ исследуемых проб методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [9].

Описание операций подготовки образцов кварцевого сырья к исследованиям методом ЭПР и методика проведения анализа изложены в ряде публикаций [2, 3, 6–10]. Было показано, что метод ЭПР позволяет получать важную информацию о структурных особенностях минерала не только при изучении монокристаллов размером $\sim 5\div 10$ мм, но и при исследовании образцов мелкокристаллического кварца с размером зерен ($0,5\div 0,01$) мм, т. е. кварцевой крупки. Установлено, что в спектрах ЭПР таких образцов изоморфным примесям Al, Ti и Ge отвечают разные сигналы [3, 8, 9]. Амплитуды этих сигналов пропорциональны содержаниям каждой из примесей, что создает основу для их количественного измерения. Сопоставление данных исследования кварца, прошедшего глубокую очистку, методом ЭПР с результатами его химического анализа дало возможность создать стандартные образцы концентраций изоморфных примесей. Практика применения стандартных образцов при оценке качества кварцевого сырья подтвердило правильность их градуировки.

Вместе с тем обнаружилось, что измерение содержания изоморфных примесей в кварце является необходимым, но не достаточным для надежной оценки качества сырья. Его величина непостоянна и может варьировать в широких пределах при изменении параметров технологического передела кварцевого сырья. Причина подобного поведения содержания изоморфных примесей, как отмечалось выше, связана с внедрением атомов рассеянных примесей в кристаллическую структуру кварца при термическом воздействии. В результате в некоторых образцах кварцевого сырья концентрация изоморфных примесей может возрастать на порядок. Из этого следует, что количество рассеянных примесей в кварце и их способность мигрировать в минерале при высоких температурах являются столь же важными показателями качества кварцевого сырья, как и содержание изоморфных примесей. Чем меньше концентрация рассеянных примесей и ниже их диффузионная подвижность при нагревании кварца, тем более эффективным окажется процесс его обогащения.

Поэтому оценка кварцевого сырья на стадии геологического изучения на пригодность получения кварцевых концентратов должна включать в себя два этапа. На первом этапе необходимо определить содержание изоморфных примесей в образцах кварцевого сырья, а на втором — оценить масштабы перехода рассеянных примесей в кварце в изоморфную форму при термообработке. При этом полученные на втором этапе данные следует использовать для разработки технологических приемов, снижающих интенсивность такого перехода. Тем самым проводимая оценка не должна ограничиваться формальными качественными показателями исходного кварцевого сырья, а дополняться анализом возможностей разработки технологий, обеспечивающих получение кварцевых концентратов с минимальными содержаниями изоморфных примесей. В этом авторы видели главную цель создания нового метода опережающей диагностики обогатимости кварца.

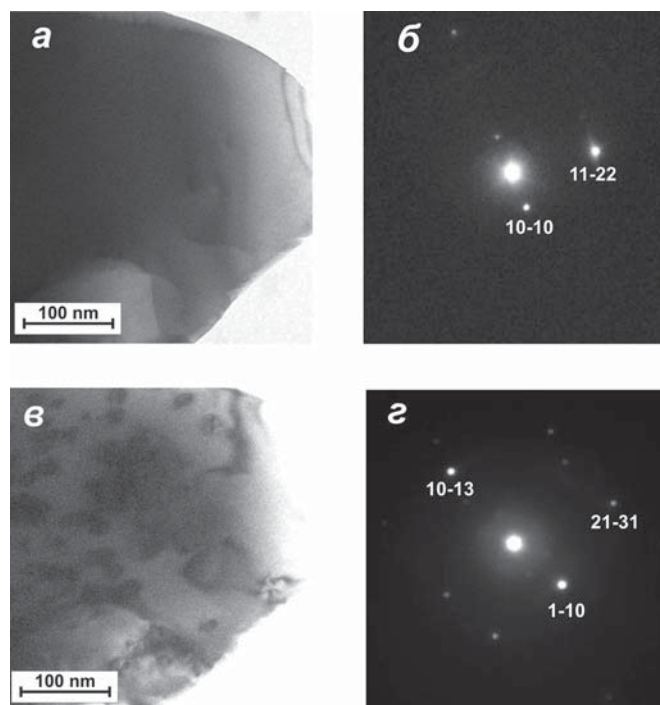
Рассматривались различные подходы к решению этой проблемы. Было показано, что примеси в кварце локализируются не произвольным образом, а занимают определенные положения относительно друг друга. Чаще всего наблюдаются скопления различных видов примесей, прежде всего минеральных и газовой-жидких включений в зонах дефектности минерала. Здесь же концентрируются и рассеянные примеси, локализующиеся на дефектах кристаллической структуры. Установлено, что под воздействием микроволновых полей полости в кварце могут освободиться от газовой-жидких включений, а сохранившиеся вакуоли способны перемещаться в пространстве [6]. Их новые положения могут быть приурочены к граням роста кварца или протяженным дислокациям. Вместе с ними в эти зоны перемещаются и рассеянные примеси, откуда они могут быть удалены в ходе технологического передела.

Дальнейшие исследования позволили обнаружить ряд других неизвестных свойств зон локализации примесей в кварце, названных демпферными. Одной из них является способность демпферных зон переходить в вязко-текучее состояние при нагревании кварца до температур выше 400 °С [7]. Благодаря этому свойству вакуоли и рассеянные примеси могут диффундировать в кварце при термическом воздействии на минерал. Кроме того, было установлено, что радиационное или микроволновое излучение способно вызывать коагуляцию рассеянных примесей, что ограничивает их проникновение в кристаллическую структуру кварца.

Описанные явления можно непосредственно наблюдать при исследовании кварца методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). В качестве примера на рис. 1 приведены результаты изучения на просвечивающем электронном микроскопе «Technai-12 TWIN» образца монокристаллического кварца из хрусталеносных камерных пегматитов Кент (Ц. Казахстан). Без термообработки в нем присутствует концентрация изоморфного Al, равная 6 г/т, что приближается к среднему уровню содержания этой примеси в кварцевом сырье. Однако после прогрева кварца при температуре 800 °С его концентрация уве-

личивается до 34 г/т. Столь значительный рост содержания изоморфного Al свидетельствует о наличии в кварце большого количества рассеянных примесей, которые внедряются в кристаллическую структуру минерала при высоких температурах. Их нахождение в кварце можно зарегистрировать методом ПЭМ, если искусственным образом вызвать коагуляцию рассеянных примесей, приводящую к образованию частиц микроскопического размера. Данные наших исследований свидетельствуют, что подобный процесс может быть реализован при облучении кварца электронным пучком высокой интенсивности.

На рис. 1а и 1б представлены микрофотография и микродифракционная картина указанного образца, полученные для стандартного режима наблюдения кварца в просвечивающем электронном микроскопе при напряжении 100 кВ. На рис. 1в и 1г даны те же характеристики кварца, полученные после облучения его в микроскопе электронным пучком высокой мощности. Видно, что после интенсивного радиационного воздействия характер распределения примесей в кварце кардинально меняется. Вместо относительно равномерного распределения примесей по объему (рис. 1а) появляется картина их неравномерного распределения (рис. 1в). Перемещение рассеянных примесей в демпферной зоне оказывается возможным после перехода ее в вязкотекучее состояние вследствие нагрева электронным пучком. Образование примесных частиц микроскопического размера (рис. 1в) является результа-



Микрофотографии и микродифракционные картины демпферной зоны образца монокристаллического кварца из хрусталеносных камерных пегматитов Кентского пегматитового поля (Ц. Казахстан), полученные при стандартном режиме наблюдения кварца в просвечивающем электронном микроскопе «Technai-12 TWIN» (1а и 1б) и после облучения кварца интенсивным пучком электронов (1в и 1г)

том коагуляции рассеянных примесей, имеющих разный электрический заряд. После «сбрасывания» демпферной зоной рассеянных примесей ее кристаллическая структура становится более совершенной, о чем свидетельствует появление дополнительных максимумов микродифракции (рис. 1г). Обнаружено, что коагулированные частицы, формирующиеся из рассеянных примесей, возникают при определенных дозах радиационного облучения. Если дозы малы, то коагуляции примесей не происходит, а если превышают допустимые значения, то коагулированные частицы разрушаются [7]. На процесс коагуляции рассеянных примесей в кварце могут оказывать влияние также концентрация примесей и их состав.

Приведенный пример наглядно показывает, что предварительная обработка кварца в радиационном поле может переводить рассеянные примеси в состояние, препятствующее их проникновению в кристаллическую структуру минерала. Этот эффект рассматривался авторами как основополагающий и был использован при разработке нового метода опережающей диагностики обогатимости кварца. При этом учитывалось, что при предварительной обработке кварца возможно применение любого энергетического воздействия, способного вызвать коагуляцию рассеянных примесей. Из числа наиболее доступных и достаточно эффективных способов достижения указанной цели было выбрано облучение кварца волнами сверхвысокой частоты (СВЧ). Метод включает в себя следующие операции. Представительную пробу кварца делят на три образца, каждый из которых подвергают облучению γ -квантами или электронами. Радиационная обработка кварца переводит структурные примеси в парамагнитное состояние, позволяющее их регистрировать методом ЭПР. После этого в первом образце определяют исходное содержание структурных примесей C_1 . Второй образец перед облучением подвергают термической обработке и определяют содержание структурных примесей C_2 . Оно отвечает сумме примесей, первоначально присутствовавших в кварце и образованных после перехода рассеянных примесей в изоморфную форму при термообработке. По этой причине должно выполняться соотношение $C_2 \geq C_1$. Третий образец перед облучением активируют СВЧ-полями, подвергают температурной обработке и определяют содержание структурных примесей C_3 . Его значение, меньшее чем C_2 , показывает в какой мере воздействие СВЧ-полей снижает переход рассеянных примесей в изоморфную форму при термообработке. В соответствии с этим показатель обогатимости (P) кварца оценивается по соотношению $P = (C_2 - C_3) / (C_2 - C_1)$. Отсюда ясно, что показатель обогатимости может изменяться от 0 до 1.

Результаты использования метода опережающей диагностики обогатимости кварца для оценки качества кварцевого сырья некоторых месторождений Карелии

Месторождение, тип кварца	Типы структурных примесей	C_1 , г/т	C_2 , г/т	C_3 , г/т	P
Фенькина Лампи, молочно-белый жильный кварц	Al	3,2	12	7,0	0,57
	Ti	<0,1	<0,1	<0,1	
Восточная Хизоваара, кварц метасоматический	Al	3,7	22	3,7	1,0
	Ti	<0,1	1,7	<0,1	
Рухнаволок, жила 7, кварц гранулированный	Al	9,0	17	14	0,38
	Ti	1,5	3,0	2,1	

Таким образом, новый метод дает возможность оценить обогатимость кварцевого сырья с использованием СВЧ-обработки и определить его качество после обогащения. Эффективность технологии обогащения кварца оценивается показателем P . Технология может считаться приемлемой, если величина P варьирует в пределах 0,5–1. Общее содержание структурных примесей, которое сохраняется в кварце после его обогащения, определяется значением C_3 . Оно и служит критерием качества кварцевого сырья.

В предыдущих работах содержание структурных примесей после прогрева кварца C_2 принималось в качестве порога обогащения [10]. Это было обосновано неизбежностью роста концентрации структурных примесей при обогащении кварца, поскольку она включает в себя термообработку.

В настоящем способе учитывается, что этот порог может быть снижен за счет СВЧ-обработки кварца, и его оценка уже проводится по значению концентрации $C_3 \leq C_2$.

Опробование предлагаемого способа осуществлялось на пробах природного кварца различных генетических типов из месторождений Карелии. В таблице приведены значения концентраций изоморфных примесей C_1 в исходных образцах кварца, их концентраций C_2 после термической обработки образцов и концентраций C_3 в образцах, прошедших полный цикл технологических операций. Значение P оценивалось по изменению в процессе передела содержания в кварце изоморфного Al.

Таким образом, новый способ оценки качества кварцевого сырья позволяет выявить наиболее перспективные его виды и разрабатывать эффективные технологии его обогащения. Он дает возможность оценивать общее содержание в кварце изоморфных примесей и прогнозировать поведение рассеянных примесей в процессе технологического передела. Эта информация имеет приоритетное значение при поиске качественного кварцевого сырья и определении его основных технологических свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вотяков, С.Л. Люминесцентный анализ структурного несовершенства кварца / С.Л. Вотяков, В.Я. Крохалев, В.К. Пуртов, А.А. Краснобаев. — Екатеринбург: УИФ «Наука», 1993. — 33 с.
2. Методические рекомендации. Экспрессное определение методом ЭПР содержания изоморфных примесей в образцах кварцевого сырья / Л.Т. Раков, Н.Д. Миловидова, Б.М. Моисеев. — М.: ВИМС, 1991.

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 однопикетных 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 (μРТ) 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 ограниченный диагностики ввиду близости физических свойств, например, оптических констант минералов, или присутствия в них тонкодисперсных и аморфных минералов и их агрегатов. Известно, что величина линейного