

ГБОУ ВПО МО «Международный университет природы,
общества и человека «Дубна»



Разработка и гидродинамическое моделирование
нефтяных и газовых месторождений

Лабораторные методы исследования горных пород

Дубна

д.т.н. Якушина Ольга Александровна

История развития метода

Томография – метод неразрушающего послойного исследования внутренней структуры объекта посредством его многократного просвечивания волновым излучением разной природы в различных пересекающихся направлениях.

Вычислительная, или компьютерная томография – метод восстановления внутренней структуры объекта по проекционным данным сигнала с помощью соответствующих алгоритмов. Используют разные источники возбуждения сигнала, одним из которых является рентгеновское излучение, и этот вид томографии называют: в медицине **КТ**; в промышленном применении **РТ, ПРВТ, X-ray СТ**.

Развитие компьютерной томографии связано с медицинскими исследованиями при функциональной диагностике. Нобелевская премия 1979 г. в области физиологии и медицины присуждена Г.Хаунсфилду и А.Кормаку «за развитие компьютерной томографии». Г.Хаунсфилд в Нобелевской речи отметил, что значимость сделанного в 1972 г. сообщения состоит «в демонстрации практической реализации метода», что дало мощный толчок клиническим исследованиям на последующие годы.

Рентгеновскую томографию начали использовать с 1970-х годов в промышленности для неразрушающей диагностики внутренних параметров объекта и бесконтактного измерения размеров и плотности, контроля качества промышленных изделий.

Вычислительная, или компьютерная томография – метод восстановления внутренней структуры объекта по проекционным данным сигнала (цифровым снимкам объекта, сделанным с разных точек) с помощью математических методов и алгоритмов (основаны на преобразовании И.Радона).

Используют разные источники возбуждения сигнала, одним из них является рентгеновское излучение, этот вид томографии называют в медицине КТ; в промышленности РТ, РВТ, ПРВТ, X-ray СТ.

Сущность метода РТ заключается в реконструкции (восстановлении) и визуализации пространственного распределения линейного коэффициента ослабления (ЛКО) рентгеновского излучения в плоском слое исследуемого объекта (ИО) путем математической обработки теневых проекций, получаемых при просвечивании объекта тонким рентгеновским лучом по различным направлениям вдоль исследуемого слоя.

Традиционное рентгеновское изображение (радиография) - сумма теневых проекций, проекционное наложение всех структур объекта.

Рентгеновская томография - метод исследования

- В 1990-е годы крупные зарубежные, а с начала XXI в. отечественные нефтяные компании начали использовать рентгеновскую томографию для паспортизации керна горных пород и выбора информативных участков для специальных петрофизических исследований как денситометрический метод.
- Первые попытки РТ исследования минералов сводились к получению томографического изображения внутренней структуры уникальных, не подлежащих разрушению объектов - *метеоритов* (Япония - Kondo M. et. al., 1996; , США - Carlson W.D. et. al., 1997; Keller R.A. et. al., 1999; Хозяинов М.С. и Вайнберг Э.И., первые результаты опубликованы в журнале «Геоинформатика» № 1, 1992 г.) для визуализации внутренней структуры объекта, использовавшегося для иллюстрации результатов, полученных другими методами.
- Исследования проводились главным образом на *медицинских* томографах. Изображения – интенсивности ЛКО - оценивали по шкале в «оттенках серого» или по шкале Хаунсфилда (HU).
- Системные исследования горных пород и руд в России начаты в 1993 г. , доложены на Международной конференции «Геофизика и современный мир», август 1993 г.

Рентгеновская томография - метод исследования

Эксперимент – это метод познания, при помощи которого в контролируемых и управляемых условиях исследуются явления действительности.

На практике эксперимент определяют как систему операций, воздействий и(или) наблюдений, направленных на получение информации об объекте при исследовательских испытаниях

По некоторым оценкам в развитых странах доля затрат на экспериментальные исследования достигает 15% затрат общественного труда

Важнейшим звеном, связывающим теоретические и экспериментальные методы исследования, являются измерения – как основной процесс получения объективной количественной информации о свойствах исследуемого объекта.

Суть измерения в эксперименте состоит в **сравнении путем физического эксперимента** данной величины с некоторым значением, принятым за единицу.

Рентгеновская томография - метод исследования

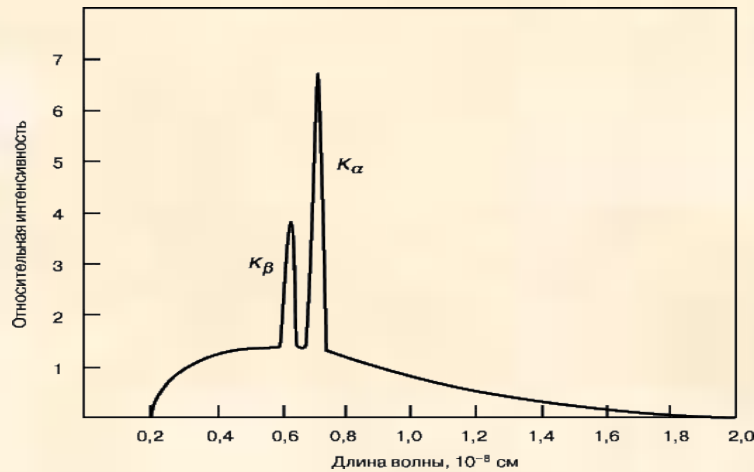
В основе измерительного эксперимента лежат физические принципы, а его реализация предполагает использование тех или иных методов, алгоритмов и методик методик.

Принцип измерений – совокупность физических явлений, на которых эти принципы основаны.

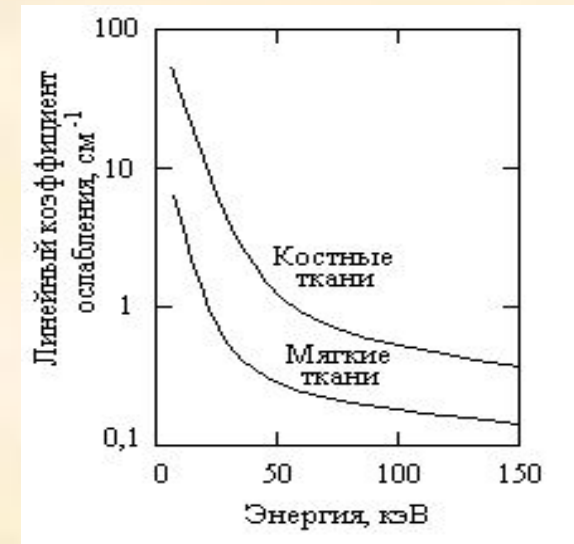
Метод измерения отражает путь, способ экспериментального нахождения физической величины и представляет собой совокупность приемов использования принципов и средств измерений

Так выглядел жесткий диск на 5 Mb в 1956 г.

Рентгеновская томография - метод исследования



Величина линейного коэффициента ослабления рентгеновских лучей (ЛКО) μ , см⁻¹ любого вещества зависит от химического состава и плотности вещества, а также от энергии гамма-излучения: $\mu = \mu_t + \mu_p$



Шкала единиц Хаунсфилда (HU)

Для практического применения – количественной оценки характеристик томограмм (в КТ исследованиях медицинского и биологического назначения) используется шкала денситометрических показателей рентгеновской плотности или «Шкала единиц Хаунсфилда» (англ. HU), соответствующая составу (плотности) биологических тканей – шкала линейного ослабления излучения по отношению к дистиллированной воде, рентгеновская плотность которой была принята за 0 HU при стандартных *давлении и температуре*

Вещество	HU
Воздух	-1000
Жир	-120
Вода	0
Мягкие ткани	+40
Кости	+400 и выше

Рентгеновская томография - метод исследования

Геообъекты – горные породы, руды, минералы и техногенное минеральное сырье - при всем их разнообразии, имеют свои определенные особенности.

Они занимают промежуточное место между биологическими тканями (μ крови 0,178, мышечной ткани 0,180 и костной ткани 0,48 см⁻¹), самая «плотная» из них, костная, соответствует «легким» минералам – кальциту с μ 0,53 см⁻¹, кварцу с μ 0,44 см⁻¹, и промышленными, металлическими изделиями – μ железа 2,91, олова 11,7, свинца 62,6, золота 98,6 см⁻¹ .

Для исследования геообъектов необходимо было определить возможности, путь и способ получения экспериментальных данных, условия и рабочие параметры средства измерений при изучении минерального вещества с использованием рентгеновской томографии.

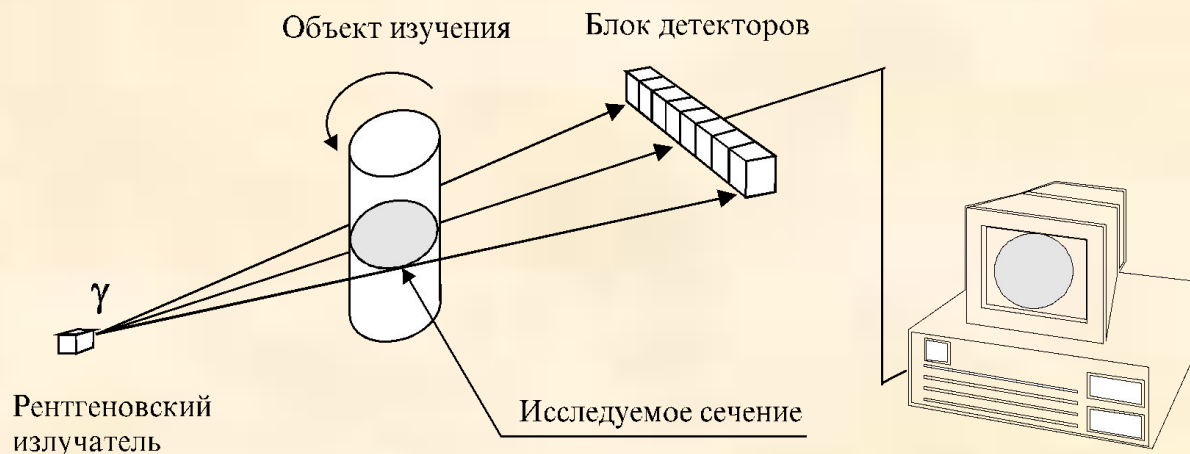
Различие промышленных и медицинских рентгеновских томографов и методик томографии в целом:

- Исследуются принципиально различные по способности ослабления рентгеновских лучей, т.е. по ЛКО, вещества:
металлы, сплавы, композиты и биологические ткани
- Разные диапазоны рабочих энергий, разные эффекты взаимодействия рентгеновского излучения с веществом:
промышленные - 200-500 кэВ до 5-6 МэВ; Комптон-эффект, медицинские - от 17 до 100 кэВ (в основном 20-25 кэВ); фотоэффект
- Разные технические решения – геометрия сканирования:
промышленные - обычно вращается исследуемый объект, медицинские - объект неподвижен.
- Разные: дозы облучения, рабочие площади сканирования и режимы сканирования:
промышленные – импульсный; медицинские - обычно непрерывный

Для решения задач исследования геообъектов средство измерения должно иметь характеристики как промышленных, так и медицинских рентгеновских томографов:

1. Минеральные объекты по основному химическому составу, физическим свойствам вещества ближе к объектам промышленной интроскопии.
Поэтому был использован томограф, аналогичный промышленным.
2. Задача исследования минерального вещества - определение фазового (минерального) состава, т.е. ведущую роль должен играть фотоэффект, когда ЛКО зависит от Z (как в медицинской рентгеновской томографии),
Поэтому томограф должен иметь рентгеновский излучатель (рентгеновскую трубку), обеспечивающую максимальную энергию нефильтрованного излучения 120 кэВ.
3. Средство измерения должно обеспечивать наибольшее возможное пространственное разрешение для выявления тонких деталей внутреннего строения геообъекта. Томографы с небольшим рабочим полем (обычно менее 5 см) обозначают «микротомограф», их пространственное разрешение составляет, как правило, десятки микрометров.
Поэтому был заказан промышленный рентгеновский микротомограф (1992 г.), рабочее поле которого уменьшено до 15 мм (вместо 50 мм).

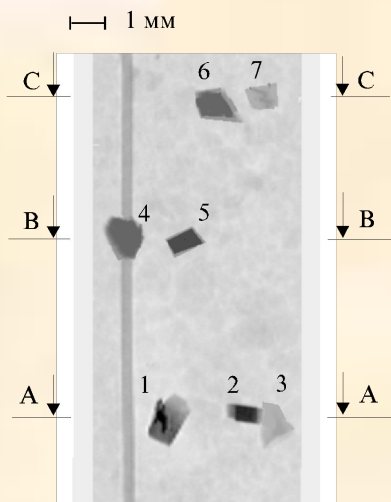
В рамках выполнения госпрограммы «Экогорметкомплекс будущего» в 1992 году была специально изготовлена отечественная аппаратура микротомограф ВТ-50-1 «Геотом» (ООО «Промышленная интроскопия»)



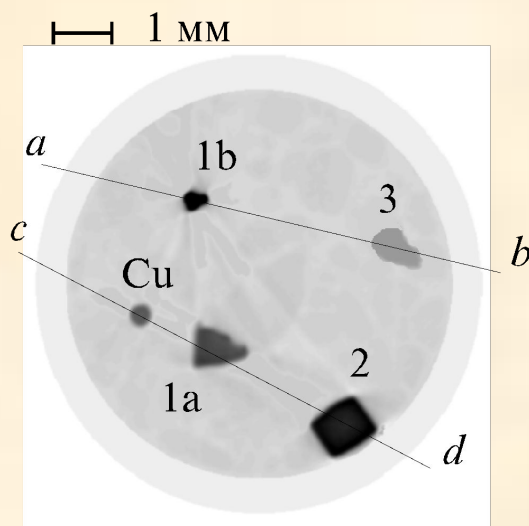
Характеристики микротомографа ВТ-50-1 «Геотом»

Диаметр исследуемого образца	до 15 мм
Высота исследуемого образца	до 80 мм
Диаметр рабочего поля (4 режима съемки)	2,5; 5; 10; 15 мм
Толщина исследуемого слоя	10 мкм
Минимальный шаг послойного сканирования	5 мкм
Чувствительность по ЛКО	около 1%
Геометрическая чувствительность	5 мкм
Пространственное разрешение	25 мкм
Напряжение рентгеновской трубки	100 кВ
Время сканирования и реконструкции томограммы	5-7 минут

Порядок проведения РТ-анализа

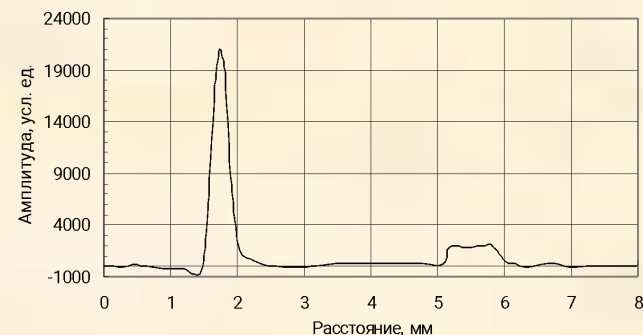


Рентгенограмма

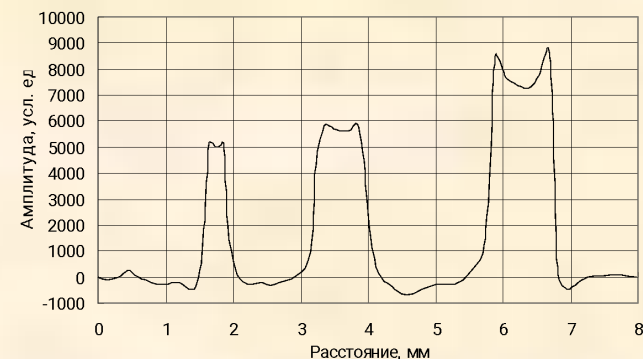


Томограмма по сечению А-А

1. Просвечивающая рентгенографическая съемка;
2. Съемка томограммы по выбранному сечению;
3. Определение экспериментальных значений ЛКО;
4. Построение профилей распределения ЛКО



Профиль ЛКО по сечению а-в



Профиль ЛКО по сечению с-д

Параметры режимов сканирования микротомографа «Геотом»

Режим сканир.	1	2	3	4
Диам.зоны сканир., мм	15	10	5	2,5
У	10	10	25	50

Расчет основных значений для анализа томограмм

Величина линейного коэффициента ослабления рентгеновских лучей (ЛКО) μ , см⁻¹ любого вещества зависит от химического состава и плотности вещества, а также от энергии гамма-излучения:

$$\mu = \mu_m \cdot \rho ,$$

где μ_m , – массовый коэффициент ослабления гамма-излучения рассматриваемого вещества при той же энергии, см²/г, ρ - плотность вещества, г/см³.

Для вещества сложного химического состава $\mu_m = \sum_i P_i \mu_{mi}$,

ЛКО эффективное

$$\mu_{\text{эфф}} = \ln(I_o / I_{\text{вых}}) / l ,$$

l – размер ИО по направлению излучения

Отношение эффективных величин ЛКО фазы (х) и образца сравнения (ОС):

$$\alpha = \mu_{\text{эфф}}^x / \mu_{\text{эфф}}^{\text{ос}}$$

Преимущества метода РТ:

- метод неразрушающий,
- оперативность получения данных,
- простота подготовки образцов для анализа
(нет необходимости изготавливать полированные шлифы),
- исследование внутренних (скрытых) частей объекта в их естественной ориентации для определения морфоструктурных характеристик,
- возможность построения 3-мерных изображений

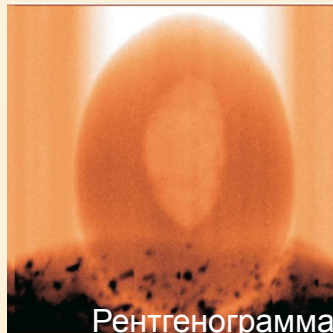
Метод можно использовать для:

- выбора наиболее информативных участков объекта для последующих прецизионных исследований;
- исследования морфоструктурных характеристик;
- исследования уникальных объектов;
- прогноза качества и предварительной разбраковки минерального сырья;
- контроля технологических процессов на производстве

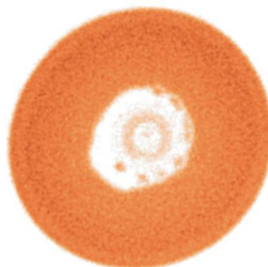


Ограничения метода РТ:

- габаритные размеры образца не должны превышать размеры прямого цилиндра высотой 80 мм и диаметром 15 мм (конструкционные особенности прибора),
- образец не должен содержать значительного количества магнитного материала,
- интегральная толщина объекта вдоль прямой по любому из направлений плоскости сечения должна удовлетворять условию: $\sum_k \mu_k x_k < 5 \div 6$, где X_k – размер k -ой структуры;
(например, для меди 4,5 мм, для железа 6,5 мм)



Рентгенограмма



Томограмма



3D-томограмма

Источники и характер искажений томограмм

- Основной вклад в неточность восстановления распределения ЛКО вносит инструментальная погрешность, связанная с неточностью измерения интегральных проекций и немоноэнергетичностью.
- *Погрешности при получении и обработке данных* проявляются на изображении томограмм в снижении четкости изображения, размытии границ между структурными элементами, возникновении вблизи таких границ артефактов.
- *Погрешности технологии проведения анализа.* Для получения качественного изображения исследуемый образец и образец сравнения должны целиком находиться в пределах зоны сканирования.

На точность реконструкции и качество томограмм влияют статистический характер и немоноэнергетичность рентгеновского излучения: эффективная энергия немоноэнергетического излучения по мере его распространения через вещество ослабляется каждым следующим элементом вещества, изменяется нелинейно и влияет на получаемые эффективные значения ЛКО; случайные погрешности реконструкции, обусловленные квантовой природой

Задачи рентгеномографического исследования геообъектов

Исследование минерального вещества для получения генетической и технологической информации о природном или техногенном сырье имеет задачей определение морфоструктурных характеристик, т.е. :

- *фазового (минерального) состава и*
- *текстурно-структурных характеристик.*

Для рентгеномографического исследования *геообъектов* необходимо было определить *способ* диагностики минеральных фаз, количественной оценки гранулярного состава и морфометрических параметров по данным РТ, а не только качественно оценивать визуализируемую картину внутреннего строения.

Идентификацию элементов микронеоднородности осуществляют путем сопоставления отношений амплитуд на томограмме для идентифицируемой фазы (ИФ) и образца сравнения (ОС) с теоретически рассчитанными для них отношениями эффективных величин ЛКО (по заданным химическому составу и плотности фаз). Результаты идентификации опираются на данные предварительного минералого-петрографического изучения.

Отношение эффективных величин ЛКО фазы (x) и образца сравнения (ОС):

$\alpha_{\text{э}} = \text{ЛКО фазы} / \text{ЛКО ос}$ сравнивается с $\alpha_{\text{т}} = \text{ЛКО фазы} / \text{ЛКО ос}$

$$\alpha_{\text{э}} = \mu_{\text{эфф}}^x / \mu_{\text{эфф}}^{\text{ос}} \quad \text{и} \quad \alpha_{\text{т}} = \mu_{\text{эфф}}^x / \mu_{\text{эфф}}^{\text{ос}}$$

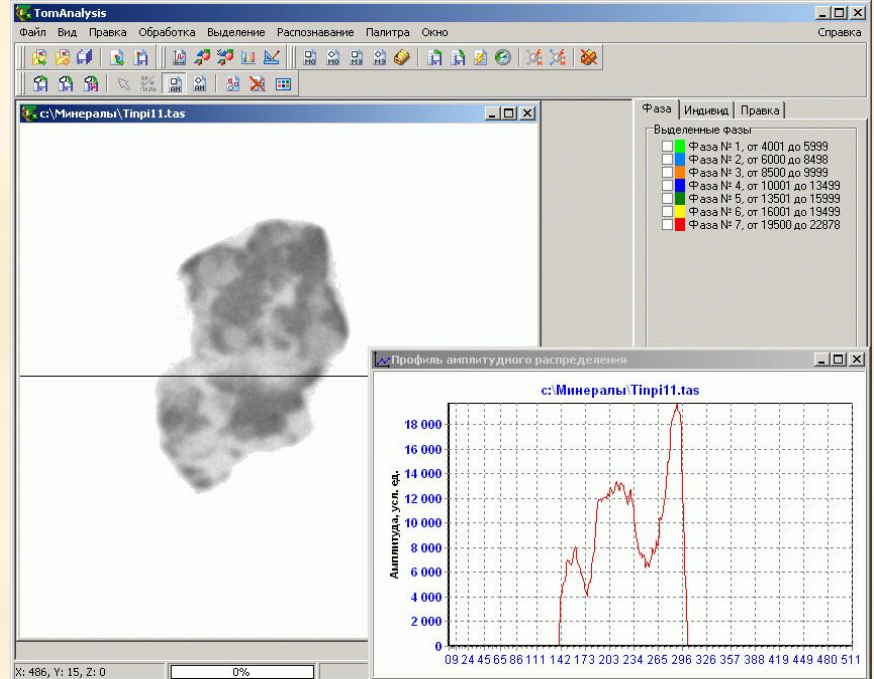
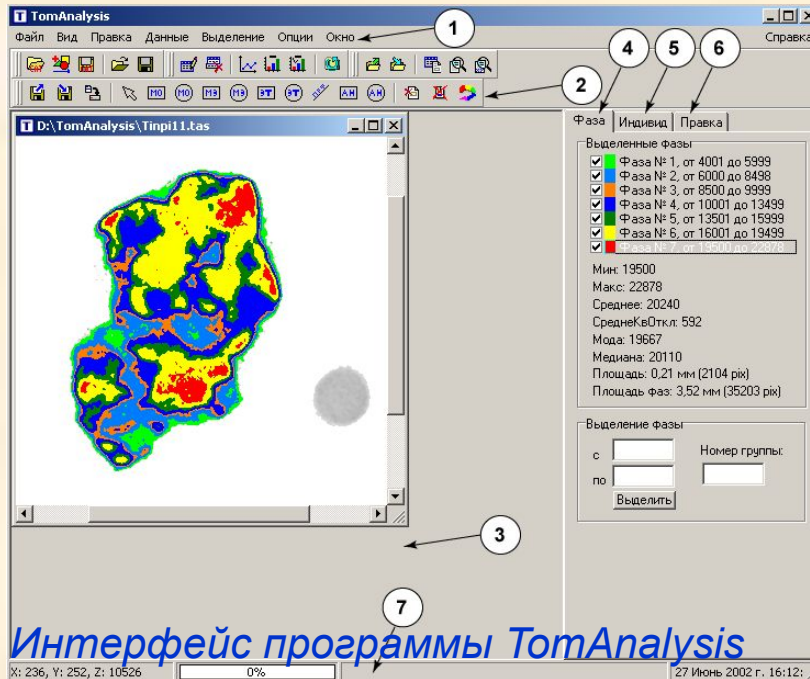
Использование ОС обеспечивает воспроизводимость исследований, точность вычисления эффективного ЛКО, делает возможным расчет эффективных ЛКО для ИО и ОС при одинаковых условиях с учетом их одновременного размещения в зоне сканирования, позволяет уменьшить погрешность вычисления этого отношения.

Разработаны образцы сравнения ЛКО моноэнергетического гамма-излучения: медь, алюминий, стекло органическое, уголь активный АГ-3, химический состав которых определен соответствующими ГОСТами.

Интерпретация результатов

- Определение характера распределения минеральных фаз (форма и размеры, характер срастаний и др.) осуществляется путем визуального (256 оттенков серого) и компьютерного анализа получаемых томограмм (диапазон измерений от 0 до 65 000 градаций), построение профилей распределения амплитуды ЛКО.
- При расчете теоретических значений ЛКО вводится поправка на немоноэнергетичность первичного рентгеновского излучения и на наличие поглощающей среды.
- Выделяют элементы микронеоднородности (минеральные фазы, пустоты, трещины) ИО и определяют диапазоны значений ЛКО, им соответствующие. Проводят идентификацию выделенных элементов микронеоднородности ИО.
- Проводят морфоструктурное исследование, определение размеров микровключений, пустот, трещин, т.п., определяют количественное соотношение выделенных фаз, в %; также особенностей их пространственного распределения.

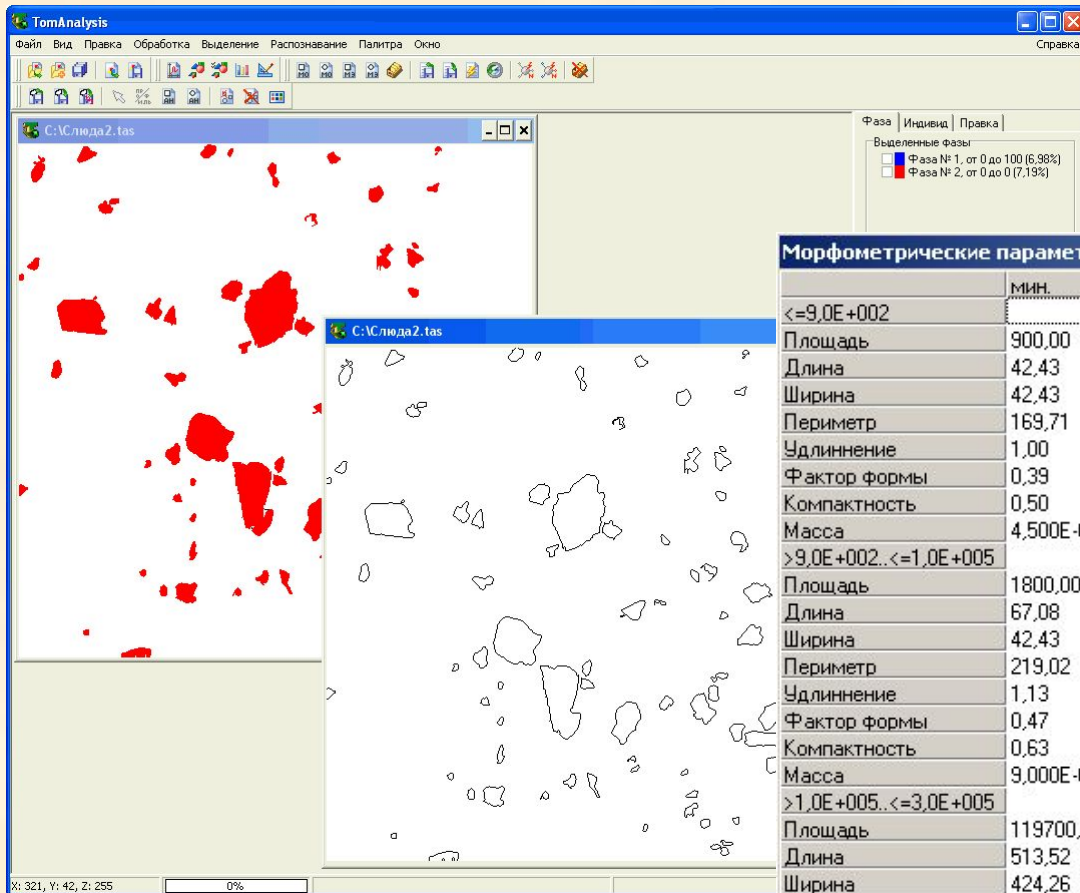
Использование системы обработки изображений «TomAnalysis»



Возможности системы: обработка цифровых массивов данных микротомографа «Геотом», оптических изображений системы "Видеомастер-56" и изображений в формате Bitmap 256 Gray Colors.

Программа позволяет: проводить разделение фаз; получать морфометрические параметры индивидов, определять объемные и массовые содержания (в %) выделенных фаз, проводить расчет гистограмм распределения частоты значений ЛКО томограммы в зависимости от ее величины.

Морфометрические параметры						
	мин.	макс.	Ср.	СрКвОткл.	Сфера	
<=9,0E+002						
Площадь	900,00	900,00	900,00	0,00		2700,00
Длина	42,43	42,43	42,43	0,00		
Ширина	42,43	42,43	42,43	0,00		
Периметр	163,71	163,71	163,71	0,00		
Удлинение	1,00	1,00	1,00	0,00		
Фактор формы	0,39	0,39	0,39	0,00		
Компактность	0,50	0,50	0,50	0,00		
Масса	4,500E-005	4,500E-005	4,500E-005	0,000E+000		1,350E-004
>9,0E+002 <=1,0E+005						
Площадь	1800,00	87299,99	33300,00	3380,89		266400,00
Длина	67,88	391,15	200,33	125,16		
Ширина	42,43	339,41	153,98	115,34		
Периметр	219,02	1461,13	708,61	477,43		
Удлинение	1,13	2,37	1,46	0,39		
Фактор формы	0,47	0,94	0,64	0,17		
Компактность	0,63	1,26	0,85	0,22		
Масса	9,000E-005	4,385E-003	1,685E-003	4,511E-004		1,332E-002
>1,0E+005 <=3,0E+005						
Площадь	119700,00	119700,00	119700,00	0,00		119700,00
Длина	513,52	513,52	513,52	0,00		
Ширина	424,26	424,26	424,26	0,00		
Периметр	1875,56	1875,56	1875,56	0,00		
Удлинение	1,21	1,21	1,21	0,00		
Фактор формы	0,43	0,43	0,43	0,00		
Компактность	0,55	0,55	0,55	0,00		
Масса	5,985E-003	5,985E-003	5,985E-003	0,000E+000		5,985E-003
>3,0E+005						
Площадь	644400,00	644400,00	644400,00	0,00		644400,00
Длина	1020,44	1020,44	1020,44	0,00		
Ширина	763,68	763,68	763,68	0,00		
Периметр	3568,23	3568,23	3568,23	0,00		
Удлинение	1,34	1,34	1,34	0,00		
Фактор формы	0,64	0,64	0,64	0,00		
Компактность	0,83	0,83	0,83	0,00		
Масса	3,222E-002	3,222E-002	3,222E-002	1,023E-006		3,222E-002



Морфометрические параметры

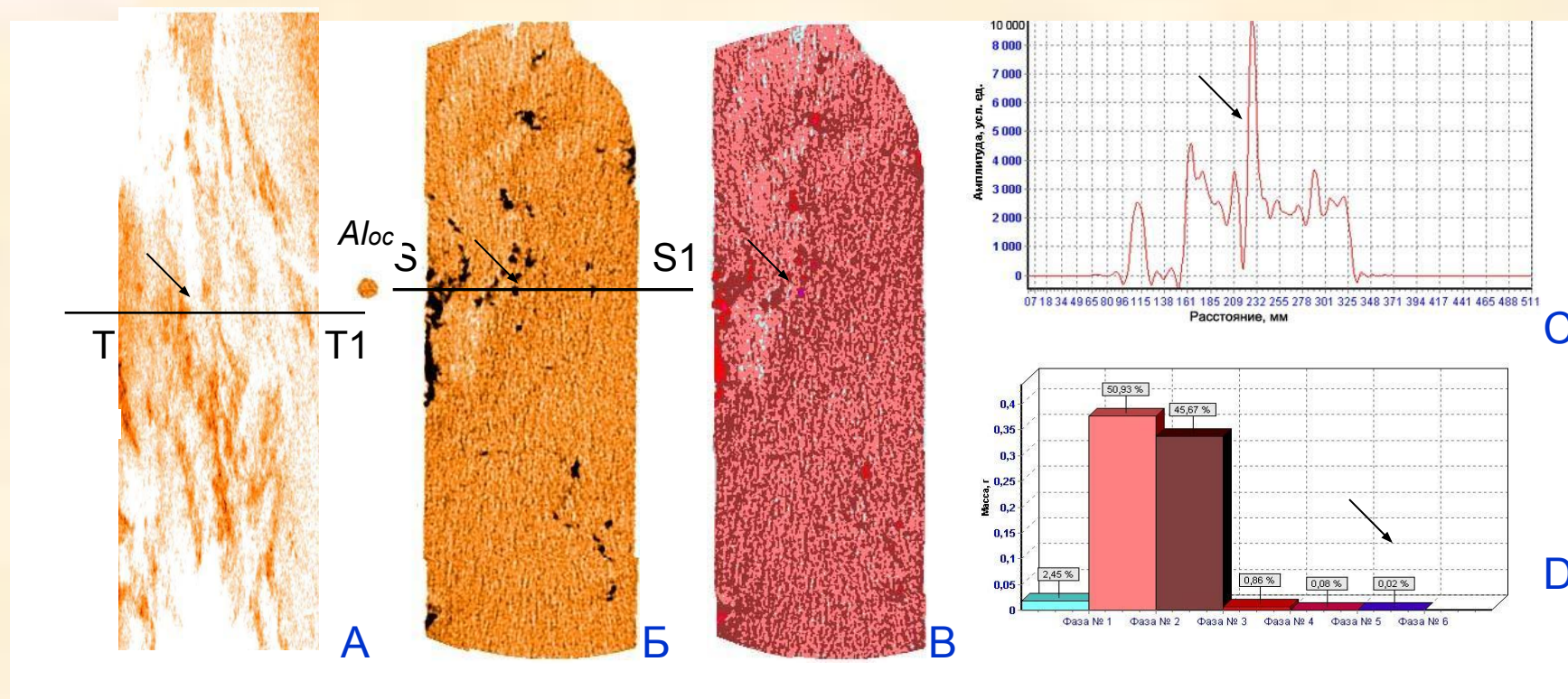
	МИН.	макс.	Ср.	СрКвОткл.	Счмм.
<=9,0E+002					
Площадь	900,00	900,00	900,00	0,00	2700,00
Длина	42,43	42,43	42,43	0,00	
Ширина	42,43	42,43	42,43	0,00	
Периметр	169,71	169,71	169,71	0,00	
Удлинение	1,00	1,00	1,00	0,00	
Фактор формы	0,39	0,39	0,39	0,00	
Компактность	0,50	0,50	0,50	0,00	
Масса	4,500E-005	4,500E-005	4,500E-005	0,000E+000	1,350E-004
>9,0E+002. <=1,0E+005					
Площадь	1800,00	87299,99	33300,00	33830,89	266400,00
Длина	67,08	391,15	200,33	125,18	
Ширина	42,43	339,41	153,98	115,34	
Периметр	219,02	1461,13	708,61	477,43	
Удлинение	1,13	2,37	1,46	0,39	
Фактор формы	0,47	0,94	0,64	0,17	
Компактность	0,63	1,26	0,85	0,22	
Масса	9,000E-005	4,365E-003	1,665E-003	4,511E-004	1,332E-002
>1,0E+005. <=3,0E+005					
Площадь	119700,00	119700,00	119700,00	0,00	119700,00
Длина	513,52	513,52	513,52	0,00	
Ширина	424,26	424,26	424,26	0,00	
Периметр	1875,56	1875,56	1875,56	0,00	
Удлинение	1,21	1,21	1,21	0,00	
Фактор формы	0,43	0,43	0,43	0,00	
Компактность	0,55	0,55	0,55	0,00	
Масса	5,985E-003	5,985E-003	5,985E-003	0,000E+000	5,985E-003
>3,0E+005					
Площадь	644400,00	644400,00	644400,00	0,00	644400,00
Длина	1020,44	1020,44	1020,44	0,00	
Ширина	763,68	763,68	763,68	0,00	
Периметр	3568,23	3568,23	3568,23	0,00	
Удлинение	1,34	1,34	1,34	0,00	
Фактор формы	0,64	0,64	0,64	0,00	
Компактность	0,83	0,83	0,83	0,00	
Масса	3,222E-002	3,222E-002	3,222E-002	1,023E-006	3,222E-002

- Количественная гистограмма
- Количественная и массовая гистограмма

Последовательность выполнения операций РТ- исследования



Методика РТ- исследования

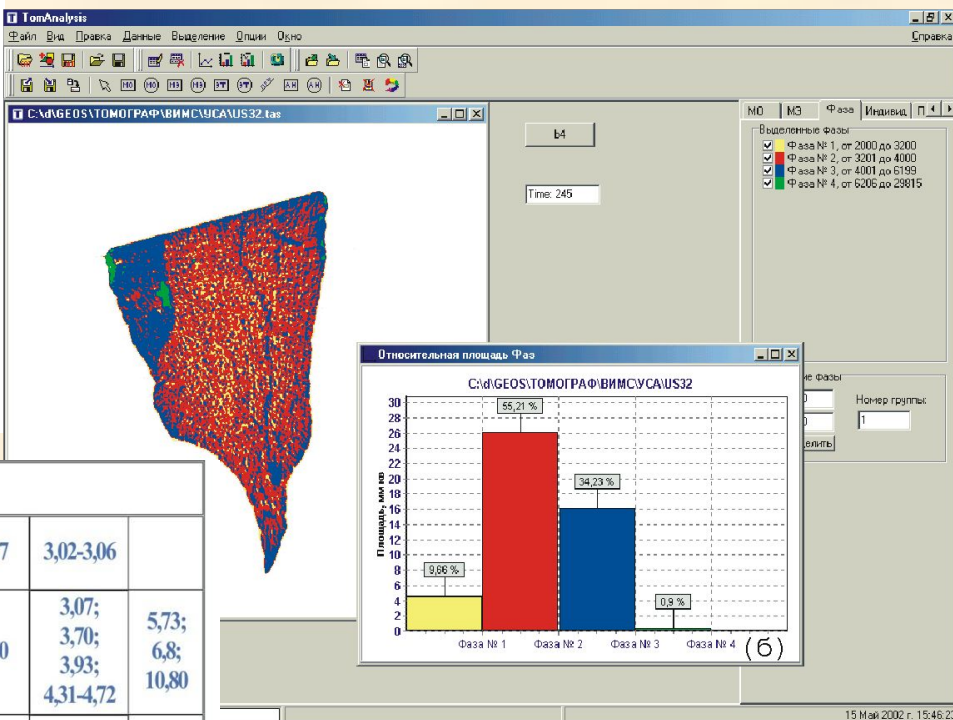


А - рентгенограмма, Б - томограмма по сечению Т–Т1 (ОС– АI),
В - обработка томограммы по программе TomAnalysis,
С - гистограмма % соотношения выделенных фаз,
D - построение профиля распределения ЛКО по линии S – S1.

Анализ морфоструктурных особенностей в исследуемых образцах

Карбонатная марганцевая руда (Усинское месторождение)

родохрозит I ген. - синее, родохрозит II ген. - красное, силикаты марганца - желтое, гидроксиды марганца - зеленое.



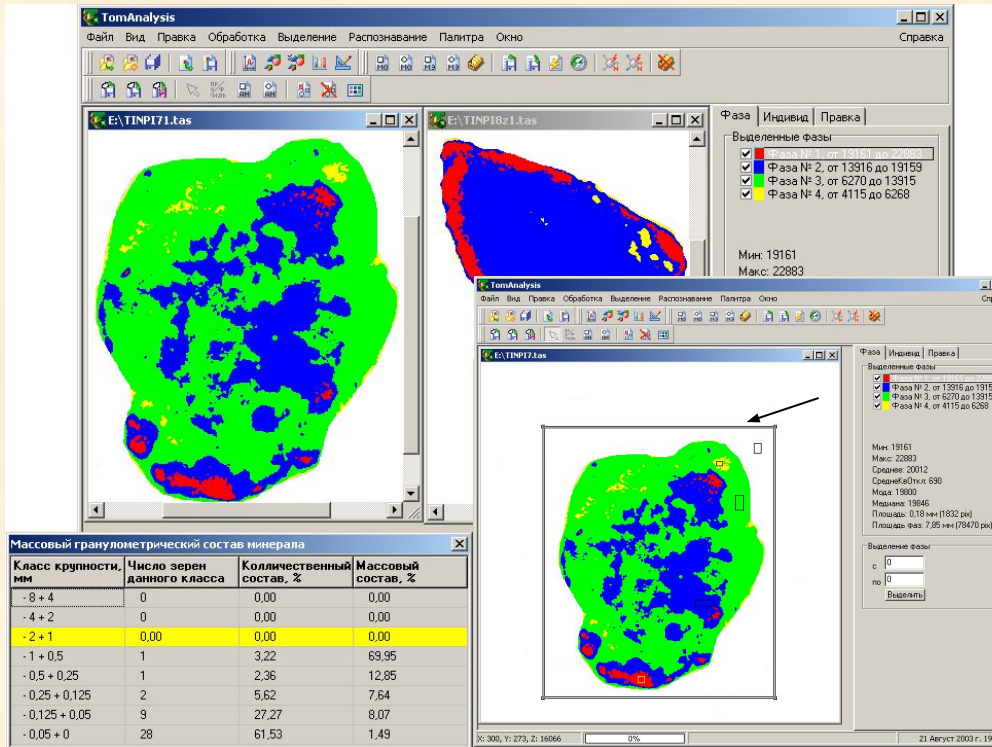
в руде выделена фаза силикатов марганца (желтый цвет)

Кл.круп., мм	Выделяемые фазы и их σ_3 (АГ- σ_3)								
	0,60-0,76	1,10-1,25	1,41-1,45	1,78-1,92	2,11-1,30	2,35-2,44	2,80-2,87	3,02-3,06	
-15 ÷ +10									
-10 ÷ +6	0,96-1,03	1,14-1,28	1,34-1,44	1,60 1,76-1,81	2,16-2,22	2,30-2,49	2,62-3,00	3,07; 3,70; 3,93; 4,31-4,72	5,73; 6,8; 10,80
-3,2 ÷ +1				1,62, 1,86-1,97	2,03-2,22		3,11	3,30-3,54	
Минералы	Слоистые алюмосиликаты	кальцит, марганцовистый кальцит	манганокальцит-1	манганокальцит-2	родохрозит III генерации	родохрозит II генерации	родохрозит I генерации	оксиды и гидроксиды Mn (зерна)	

Методические рекомендации НСОММИ №146

«Рентгеномографический анализ карбонатных марганцевых руд», 2001

Анализ морфоструктурных особенностей и прогноз технологических свойств руды

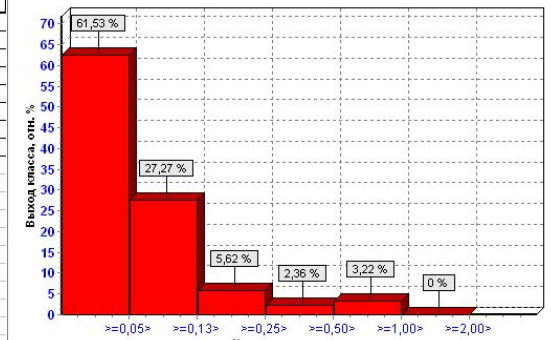


РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ОБРАЗЦА НА СИСТЕМЕ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ TOMANALYSIS

Минерал	Содержание, масс. %	Изрезанность	Размерность, мкм			Удлинение
			мин	средн	макс.	
Родохрозит	0,70	0,74	10,00	69,02	755,00	1,39

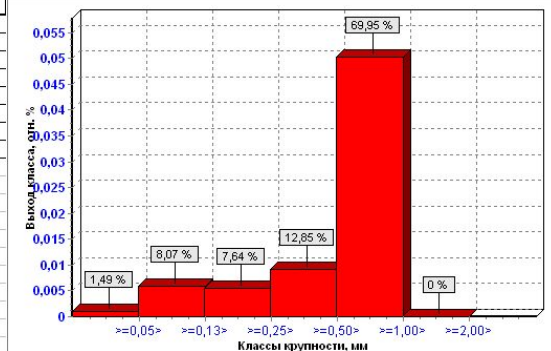
КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ РОДОХРОЗИТА (отн. %) И ГИСТОГРАММА ЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО КЛАССАМ КРУПНОСТИ

Кл. крупности, мм	Родохрозит
- 8 + 4	0,00
- 4 + 2	0,00
- 2 + 1	0,00
- 1 + 0,5	3,22
- 0,5 + 0,25	2,36
- 0,25 + 0,125	5,62
- 0,125 + 0,05	27,27
- 0,05 + 0	61,53



МАССОВЫЙ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ РОДОХРОЗИТА (отн. %) И ГИСТОГРАММА ЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО КЛАССАМ КРУПНОСТИ

Кл. крупности, мм	Родохрозит
- 8 + 4	0,00
- 4 + 2	0,00
- 2 + 1	0,00
- 1 + 0,5	69,95
- 0,5 + 0,25	12,85
- 0,25 + 0,125	7,64
- 0,125 + 0,05	8,07
- 0,05 + 0	1,49

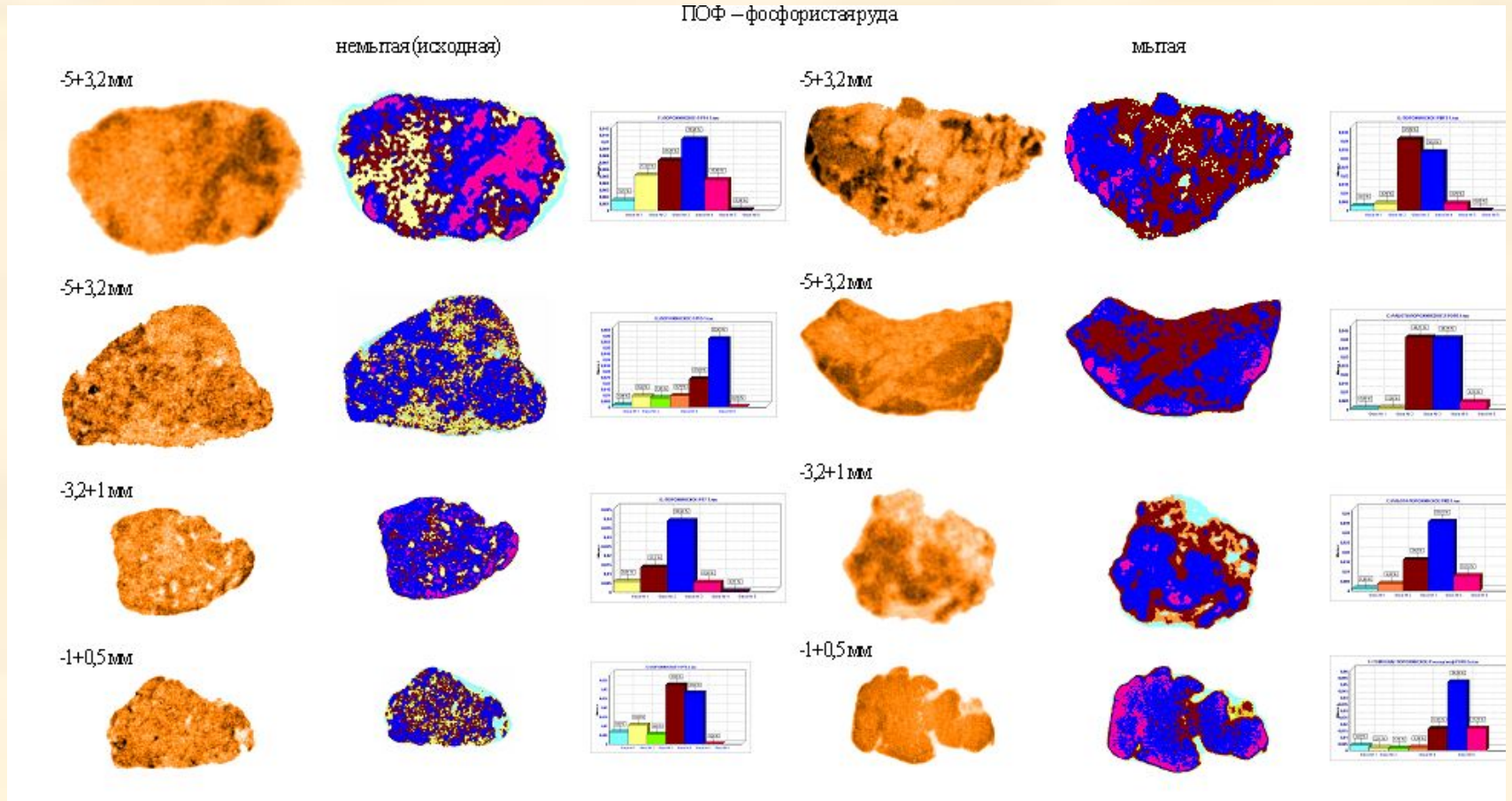


основной класс раскрытия родохрози́та I-генерации -1+0,5 мм (69,95%) при ср.размере 0,6 мм; при дезинтеграции руды образуются полиминеральные агрегаты с варьирующим содержанием нерудных минералов (карбонатных, слоистых алюмосиликатов и, реже, кремнистого материала (опала) –

Тонкое измельчение материала не позволит получить полное раскрытие зерен родохрози́та.

Прогноз технологических свойств руды - тонкодисперсность и значительная гетерогенность руды – как следствие, отсутствие разницы при измельчении между «мытой» и «немытой» рудой

(Порожинское месторождение окисленных марганцевых руд)



Томограмма, обработка по «TomAnalysis» и гистограмма % соотношения фаз:
голубое – глинистые, опал, желтое – слабоокристаллизованный кварц с апатитом, зеленое - апатит ?,
коричневое – гидроксиды железа (гидрогетит) и марганца;
синее – псиломелан-I (+нсутит, рансьеит) и псиломенлан-II (+криптомелан),
малиновое и фиолетовое – пиролюзит (+якобсит).

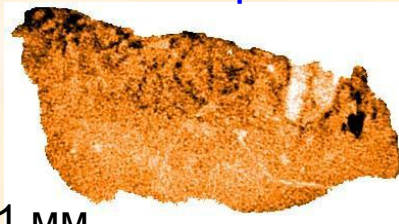
Рентгенотомографическое исследование марганцевых руд и продуктов их обогащения, на примере Порожинского месторождения

Проба	Кл.кр.,мм	Выделяемые фазы и их α_s (к Al – образцу сравнения)														
ПОМФ	без промывки	-5+3,2			1,02	1,40	1,60	1,87	2,31	2,80		3,19-3,28			5,40	
		-5+3,2						1,90		2,64	3,09	3,27	3,45	3,86		
		-3,2+1	0,35													
		-3,2+1														
		-1+0,5				1,38	1,55	1,68	2,16		3,02			3,68	4,40	
		-1+0,5														
	омылье	-5+3,2								2,53-2,63	3,04	3,25	3,40	3,62	4,25	4,68-5,05
		-3,2+1					1,52-	1,77-1,89	2,0	2,41-2,70	2,95-3,12		3,45	3,82		
		-1+0,5										3,28	3,55		4,03	
ПОФ	без промыв	-5+3,2		0,76	1,10		1,46-1,50		1,9-2,1	2,60-2,70	2,95-3,05	3,2				
		-3,2+1	0,65	0,88	1,05	1,24	1,41-1,53	1,81	1,9-2,0							
		-1+0,5	0,45				1,40	1,80	1,9-2,05	2,65	2,95-3,05					
	омыль	-5+3,2					1,45		1,9-2,1		2,90					
		-3,2+1							1,8-2,0							
		-1+0,5					1,50		1,9-2,1		2,70					
тех. пр. ПОМФ	-5+3,2	0,50-0,65	0,92	1,06-1,1		1,34		1,8-2,0	2,55	2,90			3,66			
	-3,2+1	0,6		1,13		1,4-1,5		2,05	2,67	1,98			6,7			
тех. пр. ПОФ	-5+3,2	0,65			1,24	1,45-1,5	1,66	1,9-2,09	2,45		3,0		3,5			
	-3,2+1	0,55				1,50			2,40	2,9						
Цвет на рис.		голубое	желтое	св-зелен.	лососев.	оранж.	красн.	коричневое		синее			малиновое			
Минерал		глинист (моним), опал	кварц	апатит	карбонаты, плагиоклаз	гидроксиды Fe (гидрогенит), пирооксены	псиломелан-I*		псиломелан-II*		пирролизит, криптомелан, якобит					
							гидроксиды Mn тодорокит	рансьеит, пирохроит		нсулит						

*Прим.: псиломелан разных генераций отличается по химическому составу (содержание марганца), физическим свойствам и морфоструктурным характеристикам.

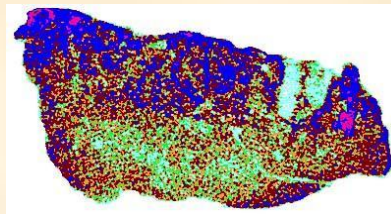
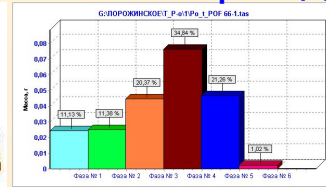
Выявление особенностей технологических свойств руды - установлен характер срастания апатита с опалом и кварцем

Порожинское месторождение окисленных марганцевых руд



1 мм

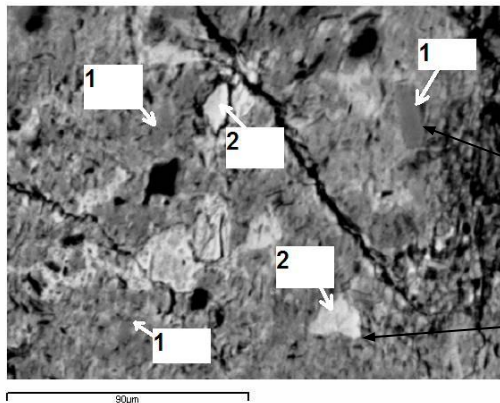
Рудный железо-марганцевый агрегат с тонкой вкрапленностью апатита



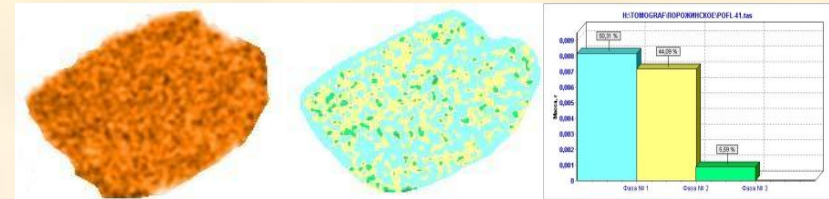
Сросток апатита с опалом и кварцем («маскирующая» апатит оболочка опала на поверхности, голубое)



1 мм



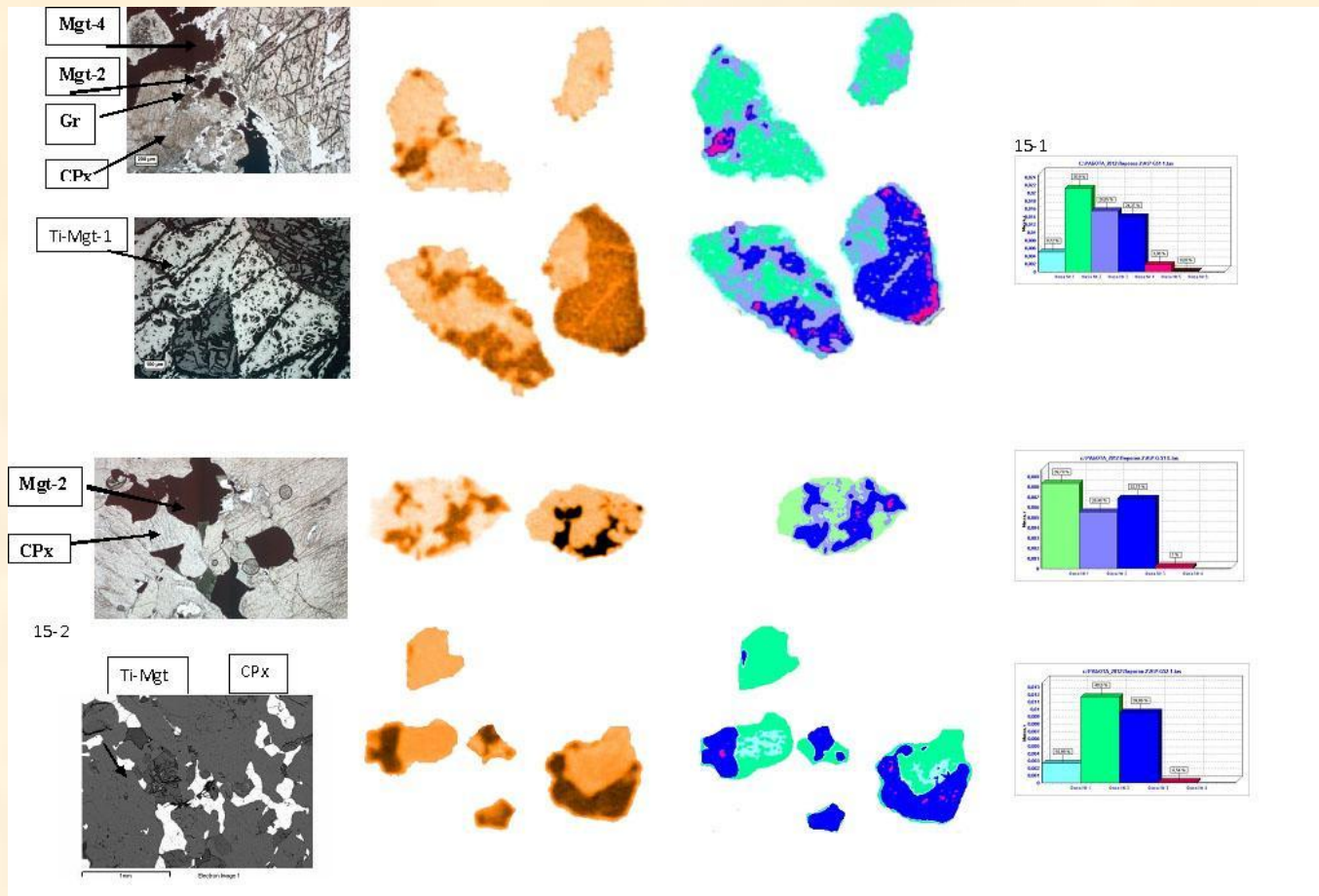
Тонкая вкрапленность апатита (1) в марганцевом агрегате преимущественно (2) псилломеланового состава (размер 10 мкм и менее)



апатит-кварц-опаловый агрегат

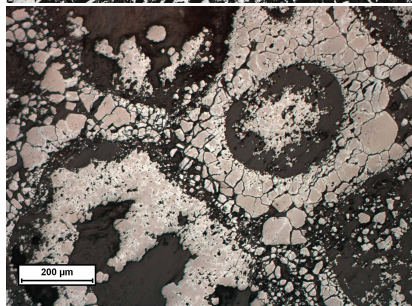
Прогноз технологических свойств руды: **характер срастания апатита** с породообразующими и рудными минералами, его размер в последних, является **неблагоприятным** для извлечения апатита из руды Порожинского месторождения методами рентгенорадиометрической сепарации и глубокого обогащения

Выявление особенностей технологических свойств руды. Гусевогорское месторождение титаномагнетитовых руд

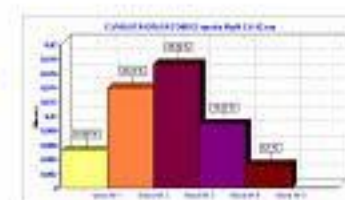
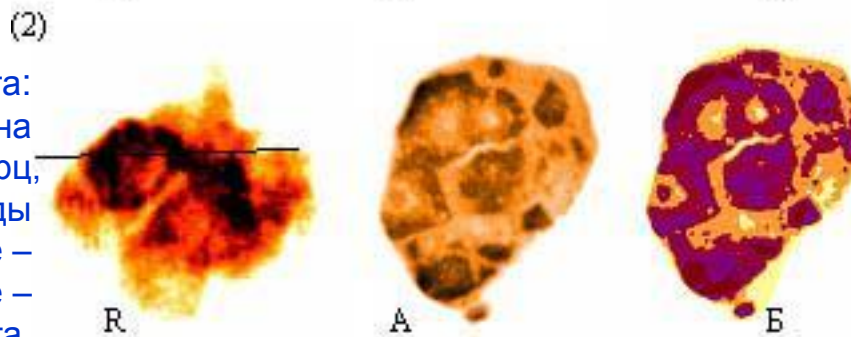
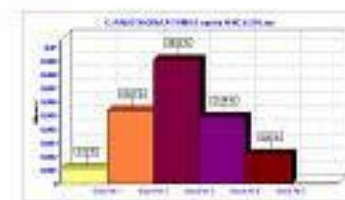
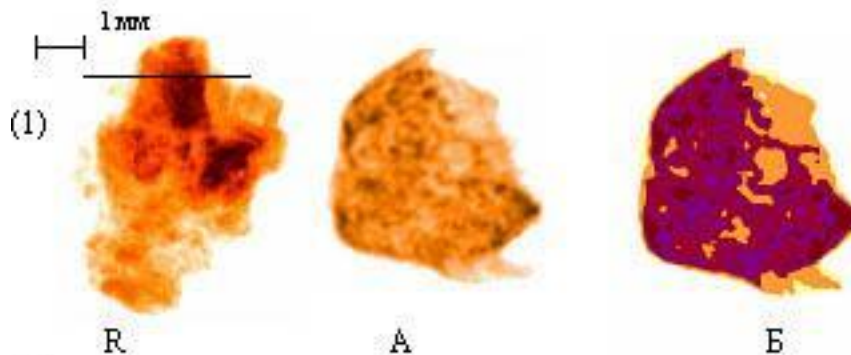
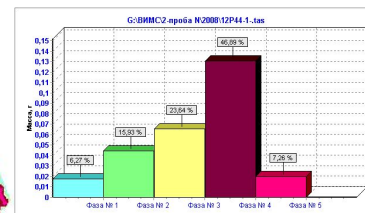
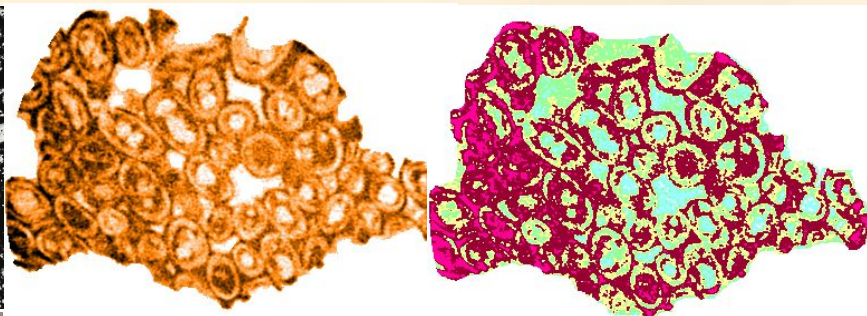


ЭМ, томограмма, обработка по «TomAnalysis» и гистограмма % соотношения фаз: породообразующие минералы голубое – слоистые алюмосиликаты, зеленое – пироксены, амфиболы; рудные минералы – сиреневое – герценин, ульвешпинель, ильменит, синее - титаноманнетит, магнетит – малиновое

Выявление особенностей технологических свойств руды Тагарское месторождение железных руд



Полиров.шлиф,
отр.свет, николи ||



Мартитизация мангетита:
R- рентнограмма, указана линия сечения); желтое – кварц, оранжевое – гидроксиды железа, темно-фиолетовое – гематит, фиолетовое – мартитизация магнетита, коричневое – магнетит)

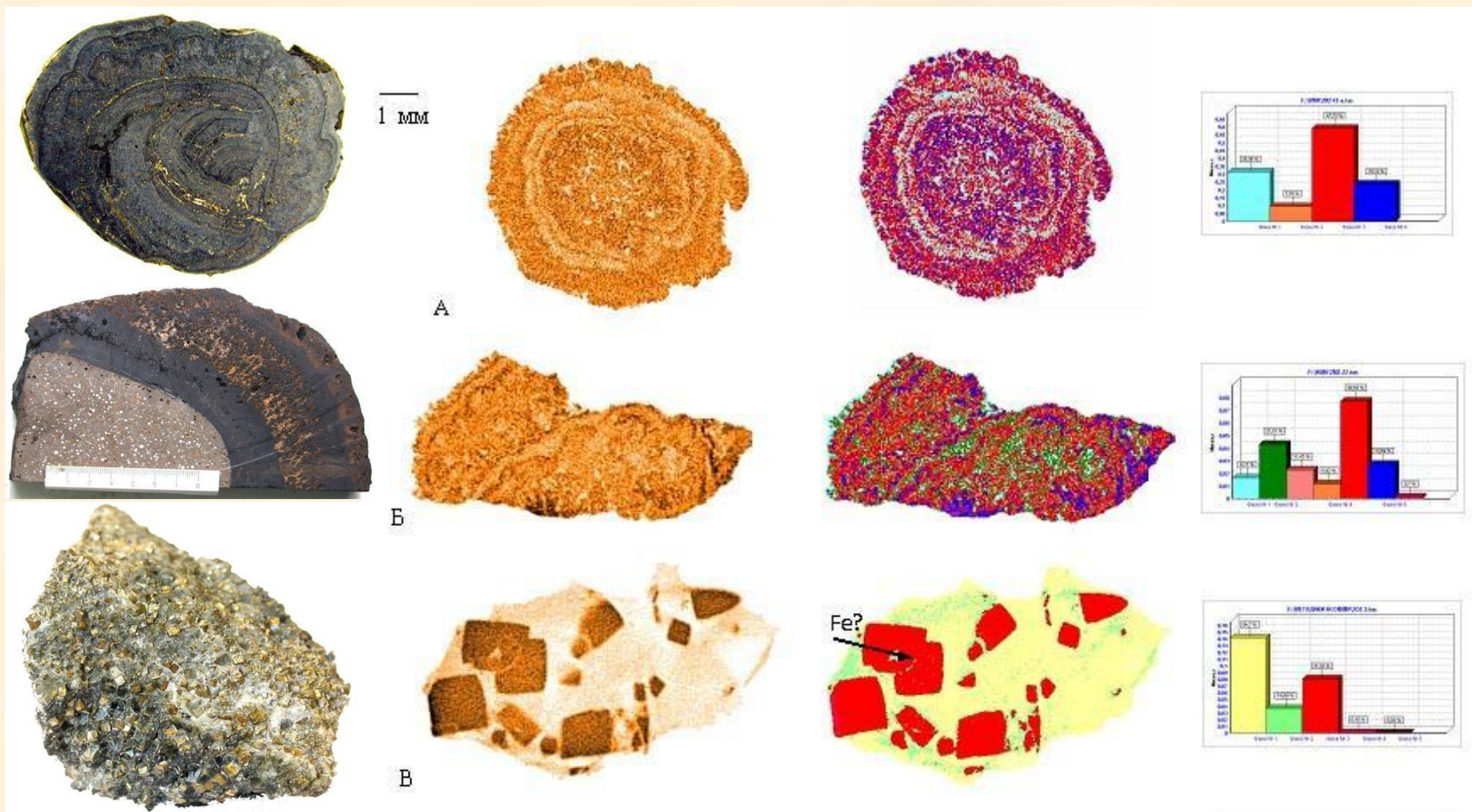
Неоднородность агрегатов и зерен магнетита, главного рудного минерала, негативно влияет на их полное раскрытие

Рентгеномографическое исследование железных руд

На примере Тагарского месторождения, технологическая проба

Проба		Выделяемые фазы и их α_0 (к Al – образцу сравнения)											
исх. пр	1и	0,56-0,68	<0,81	1,4-1,5			2,30	2,50	2,90	3,63	4,13		5,1
	2и			1,38		1,75		2,60			4,40		5,54
немаг ф	N1	0,45-0,50	0,7-0,98	1,15	1,39		2,15	2,55-2,81		3,80			5,0
	N2	0,50-0,55		1,18	1,40	1,68	2,1-2,27	2,56		3,90		4,34	4,88
магнитная фракция	1		0,75		1,2-1,25	1,77	2,1-2,34		2,97-3,10				
					1,2-1,26	1,48			3,11	3,96		4,30	5,70
	2		0,97		1,3-1,36			2,50-2,60		3,65-3,80	3,90		
	3	0,52	0,85-0,92		1,4-1,45		2,2-2,24			3,40-3,64	4,08	4,50-4,58	
	4		0,98	1,15	1,39-1,45		2,15	2,93-3,10	3,36		4,20		
	5				1,39		2,15	2,55-2,81		3,80			5,50
	6				1,40-1,45		2,15-2,2	2,60-2,78	3,30-3,40		4,32	4,69	5,2-5,24
Минерал	породообразующие				рудные минералы								
	слоды, пеннин	клинохлор	прохлорит, Fe-клинохлор	гидрогегит	гегит	гематит-1	гематит-2	гематит-3	магнетит-1,(маггемит)		магнетит-2		
				гидроксиды железа		гематит			магнетит				

Океанические руды: железо-марганцевые образования (ЖМК, КМК) и глубинные полиметаллические сульфидные руды (ГПС)

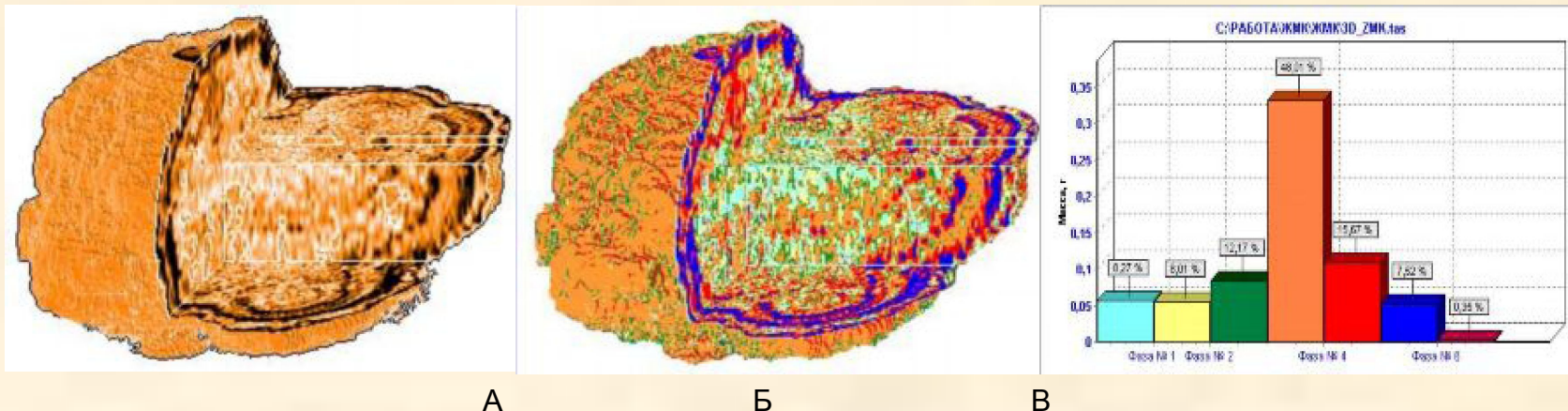


ЖМК – А , КМК – Б, ГПС – В,

слева направо: томограмма, разделение на фазы по TomAnalysis и гистограмма их количественного соотношения (голубое – породообразующие минералы, оранжевое – гидроксиды железа и марганца, красное, синее, малиновое – оксиды железа и марганца).

Железо-марганцевая конкреция

1мм



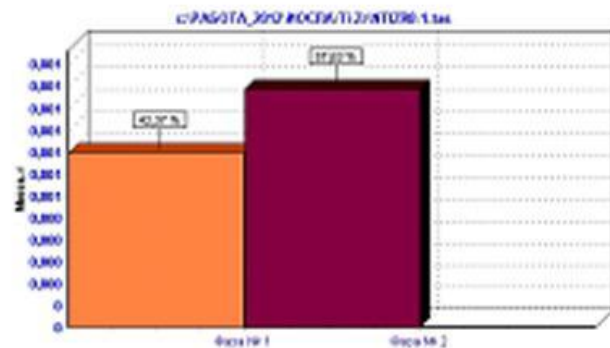
Трехмерное рентгеномтомографическое изображение железо-марганцевой конкреции (1,0x1,6 мм): томограмма (А), разделение на фазы по программе TomAnalysis (Б) и гистограмма их процентного соотношения (В).

Метод РТ позволяет оперативно устанавливать общую пористость и потенциальную сорбционную емкость агрегатов; присутствие фаз, с которыми связаны тяжелые металлы; с высокой степенью достоверности разделять рудные и нерудные (породообразующие) минералы; проводить оперативную прогнозную оценку качества ЖМО как потенциальной руды.

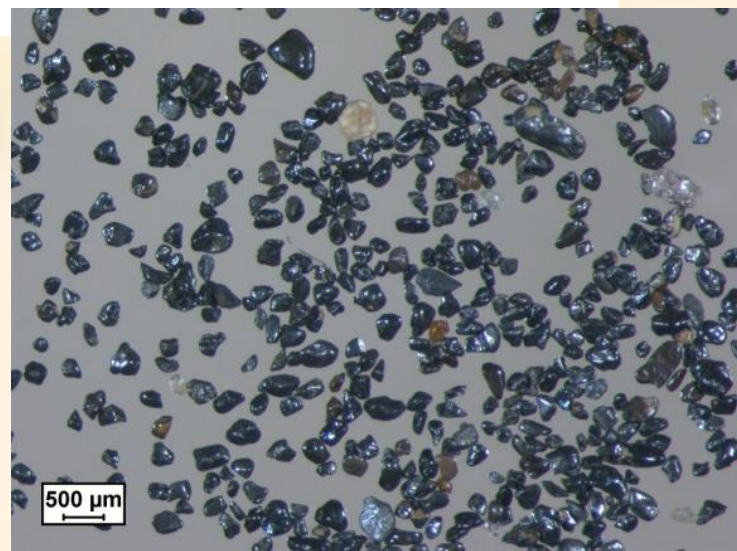
Рентгеномография зерен ильменитового концентрата



А Б В

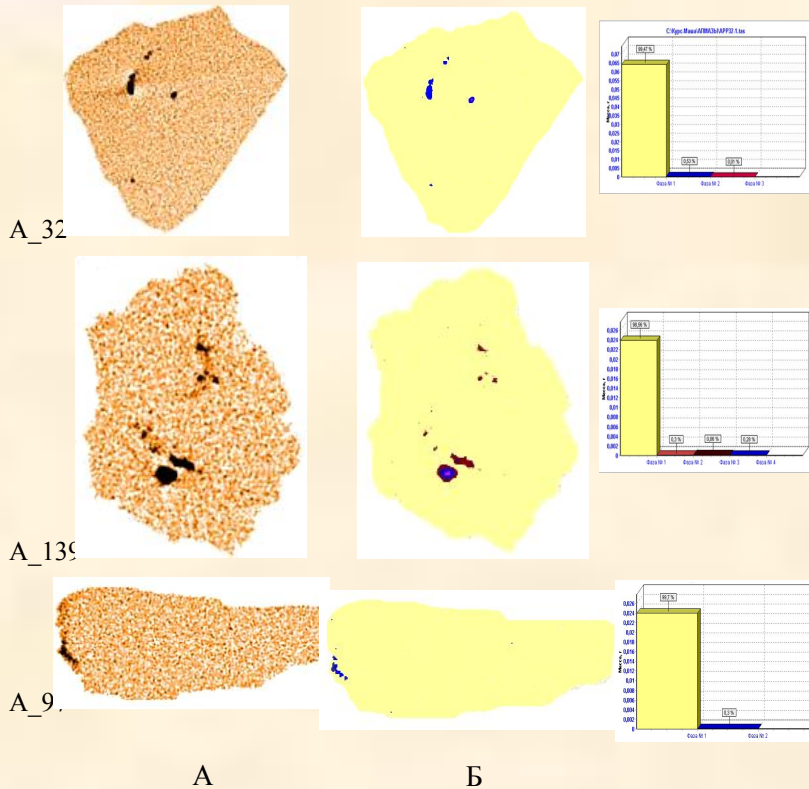


Визуально сходные зерна ильменита и псевдурютила (Индия, ильменитовый концентрат):
А - фото, Б – томограмма, В обработка по «TomAnalysis» и гистограмма % соотношения фаз; ильменит – малиновое, псевдурютил – оранжевое
(образец сравнения - алюминий марки А97 по ГОСТ 11069-85).

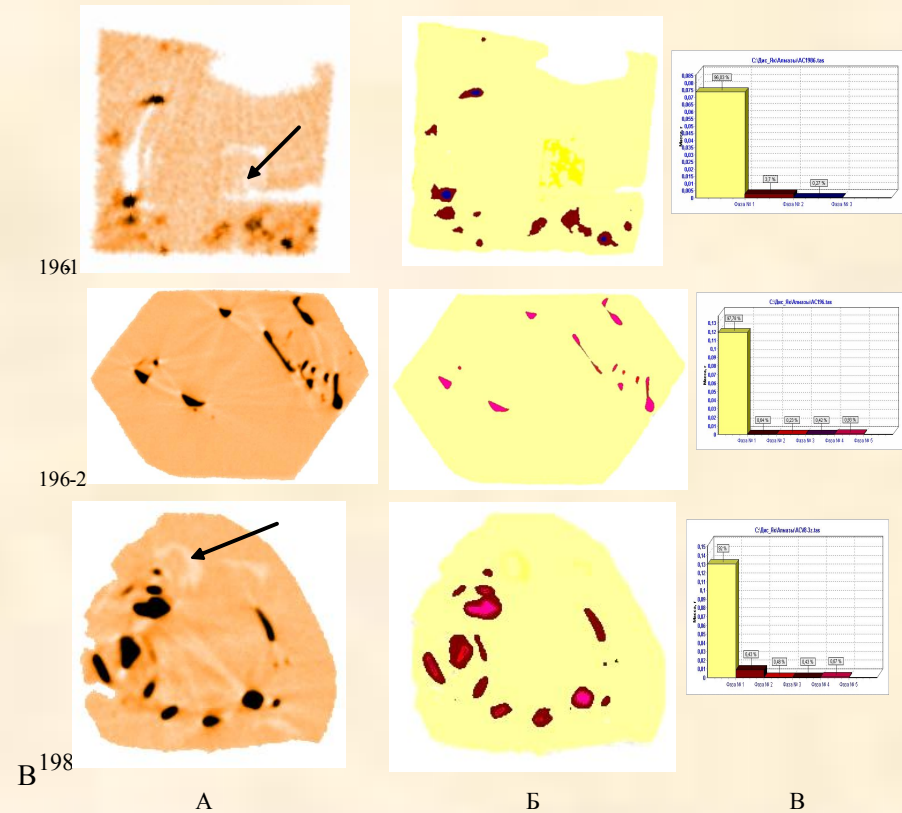


Ильменитовый концентрат, общий вид.

Исследование природных и синтетических алмазов



РТ природных алмазов с включениями, ААП:
 алмазная матрица – желтое, силикаты –
 оранжевое, оксиды (ильменит) – коричневое,
 хромшпинелиды – синее, сульфиды – красное.

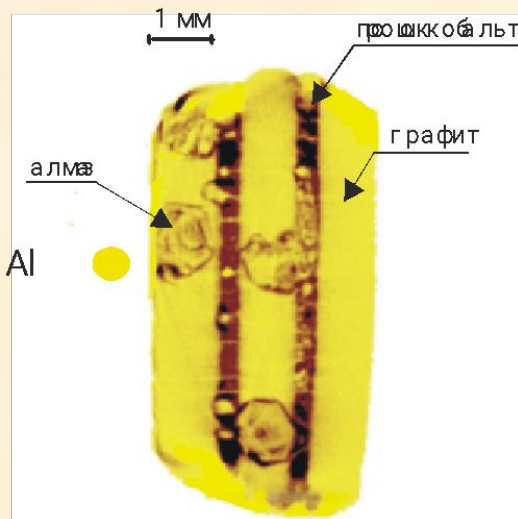
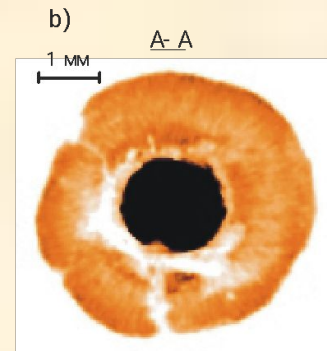
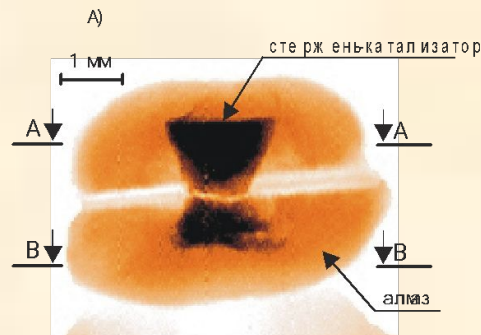
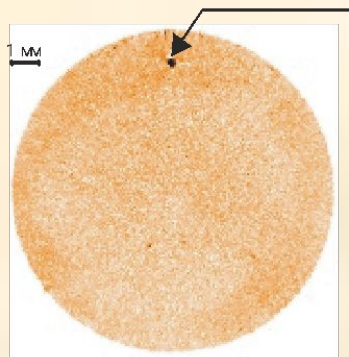
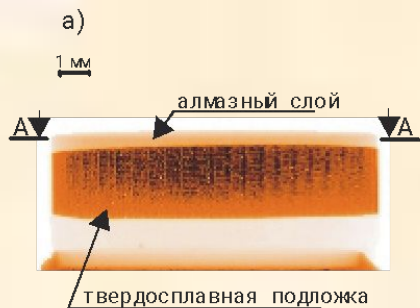


РТ синтетических алмазов, включение «кристалл в кристалле» указано стрелкой: алмазная матрица – желтое, оксиды – коричневое, карбиды металлов – коричневое, металлы (Fe) красное, Fe-Ni сплав – фиолетовое, Ni – малиновое.

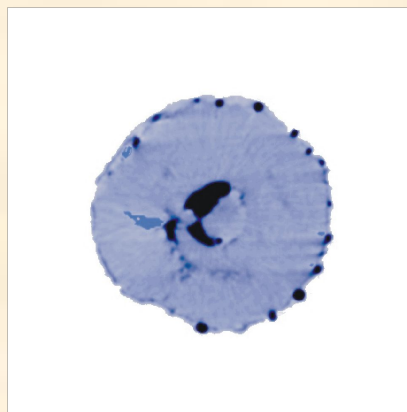
Соотношение ЛКО алмаза и его имитаций

Объект	• Формула	α_3 (Cu- <i>oc</i>)	α_3 (Al- <i>oc</i>)
Алмаз природный	C	0,04	0,55
Алмаз синтетический	C	0,04	0,55
Муассонит	α -SiC	0,098	1,40
Фианит (кубич. цирконий)	(Zr, Hf)O ₂	0,87	12,44
Гадолиний-галиевый гранат (ГГГ)	Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂	1,23	17,85
Иттрий-алюминиевый гранат (ИАГ)	(TR) ₃ Al ₂ [AlO ₄]	0,46	6,57
Титанат стронция	SrTiO ₃	0,53	7,58
Рутил (синт.)	TiO ₂	0,20	2,86
Шпинель (синт.)	MgAl ₂ O ₄	0,07	1,01
Корунд (синт., лейкосапфир)	Al ₂ O ₃	0,08	1,14

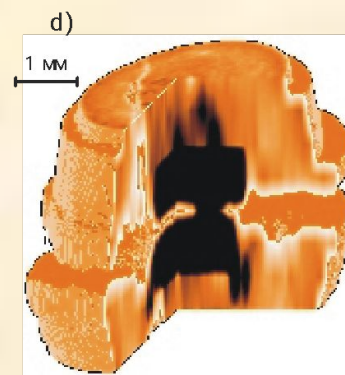
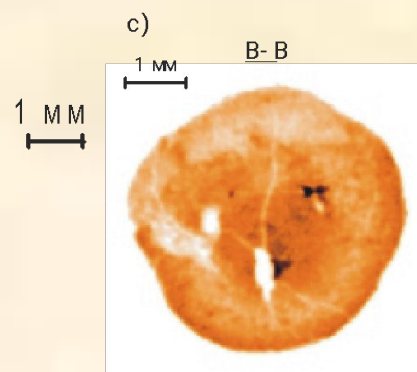
Контроль за динамикой технологических процессов



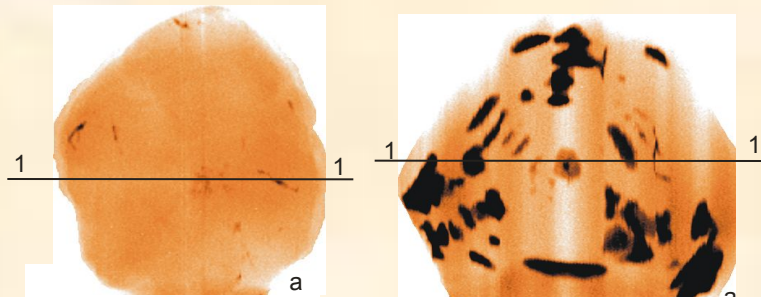
порошок катализатора (алмазотвердосплавной пластины с дефектом)



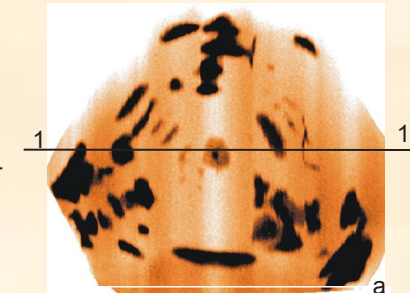
Искусственный алмаз (баллас)



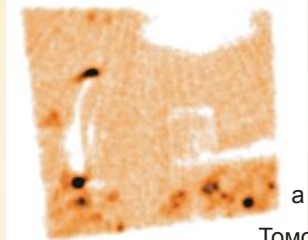
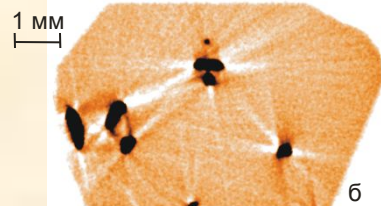
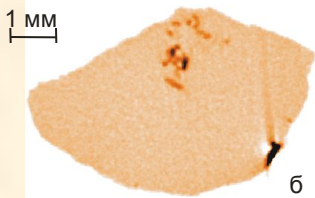
Исследование алмазов (природных, синтетических) и алмазоносных пород для обнаружения алмазов в породе и диагностики включений



Обломок кристалла алмаза.
а - рентгенограмма; б - томограмма.
В включение твердой фазы.

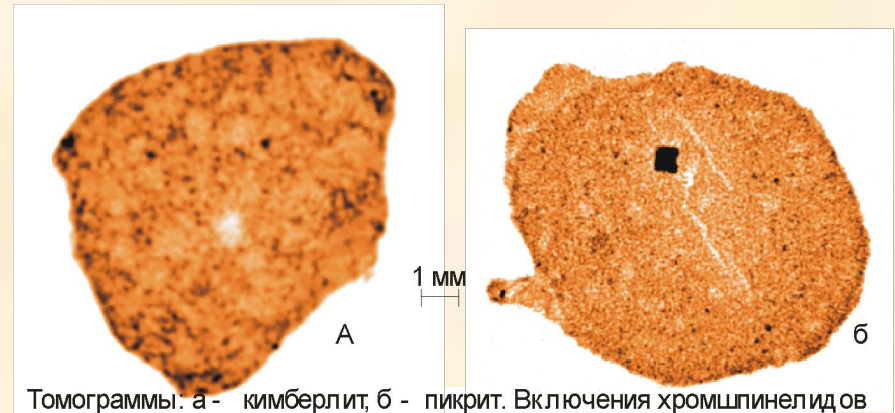


Синтетический монокристалл алмаза.
а - рентгенограмма; б - томограмма.

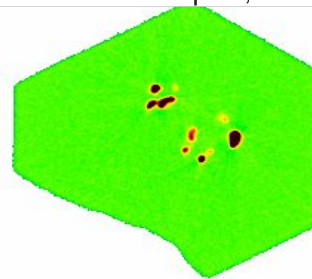


Томограммы (а, б) природных кристаллов алмаза: б- "кристалл в кристалле."

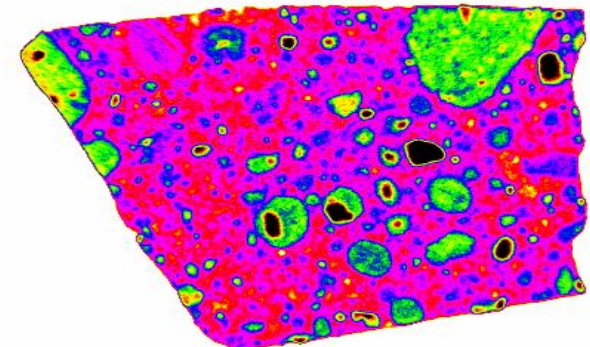
Исследования проведены совместно с геологическим ф-том МГУ им. М.В. Ломоносова



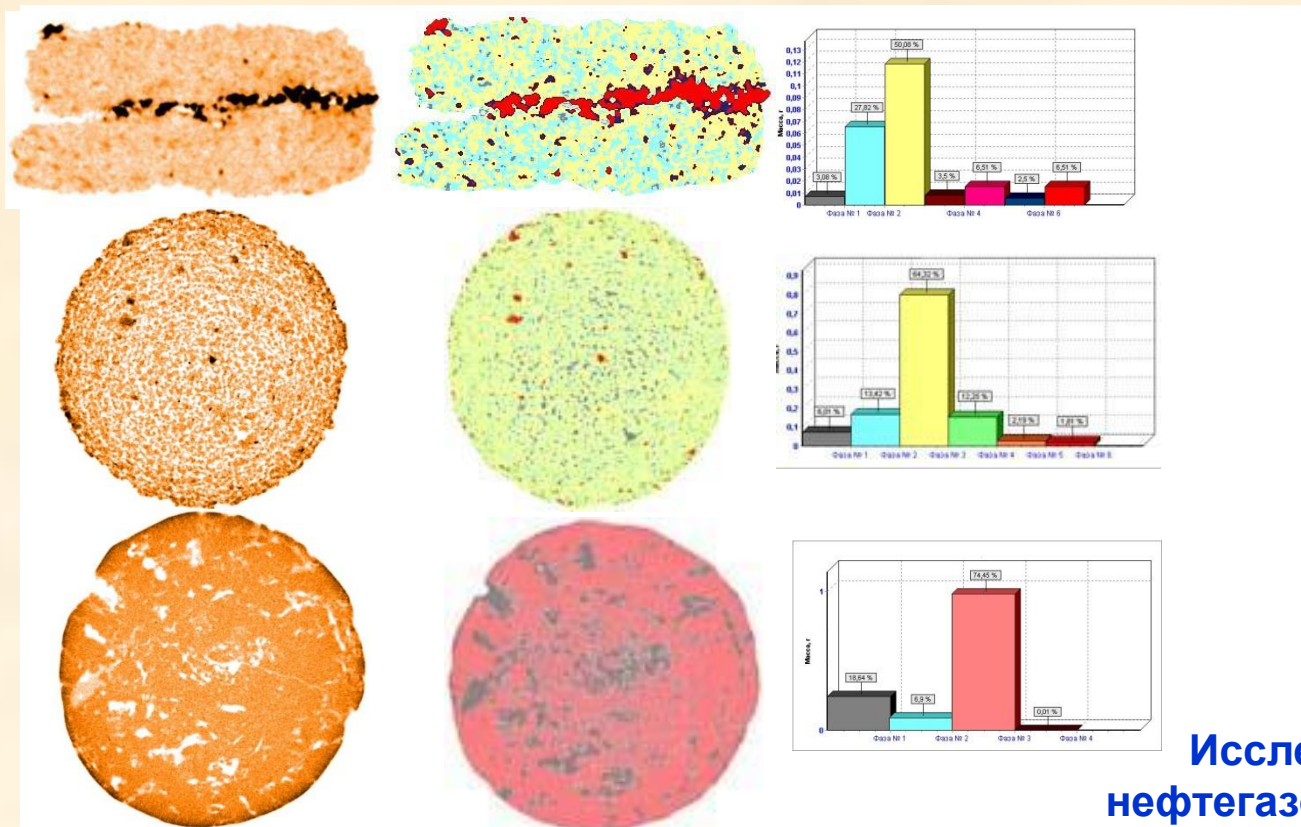
Томограммы: а - кимберлит, б - пикрит. Включения хромшпинелидов



кимберлиты



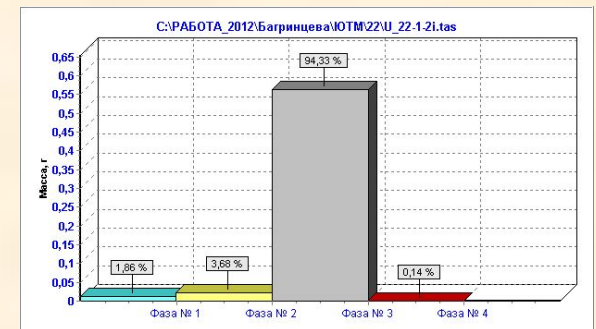
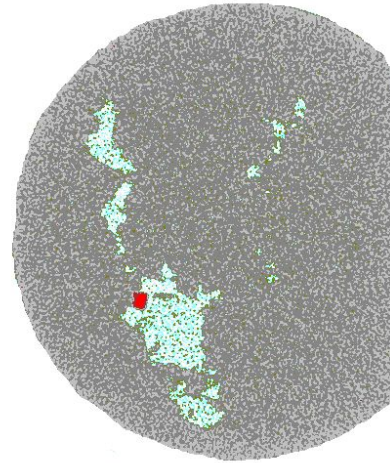
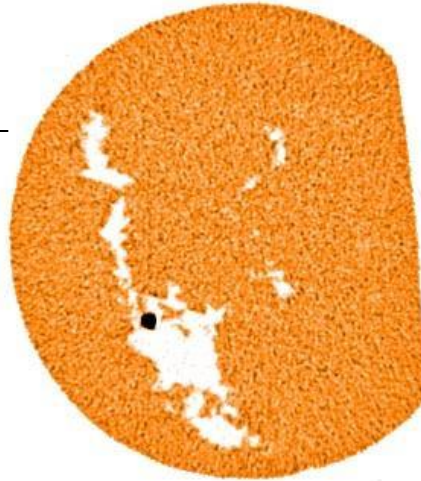
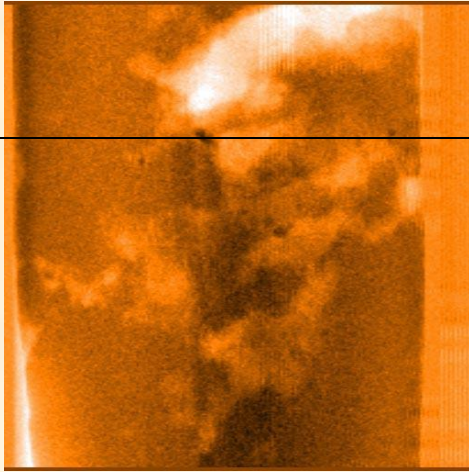
Анализ пустотного пространства и вещественного состава пород – коллекторов для нефти и газа



Исследование керна нефтегазоносных пород

Порода	выделяемые фазы и их $\alpha_{ср}$ (Al- ∞)									
песчаник	<0,35		0,7-0,9	1,10-1,25		1,78-2,2	2,35-2,44	3,9-4,2	4,4	
известняк	<0,30	0,60-0,76	0,9-1,0		1,20-1,35; 1,41-1,45					
цвет.	серое	голубое	желтое	зеленое	лососев	оранжево е	синее	красное		
минералы	поры	слоистые алюмо- силикаты	кварц	полевые шпаты	карбонаты	гидрокси ды	оксиды (Fe)	пирит	сульфи ды	

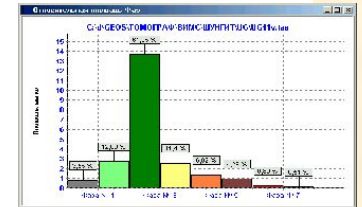
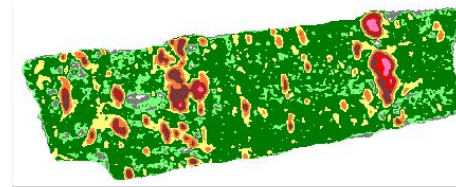
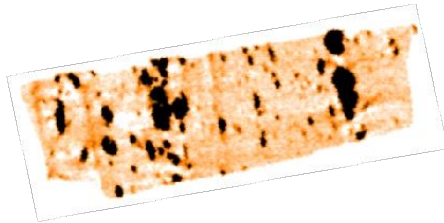
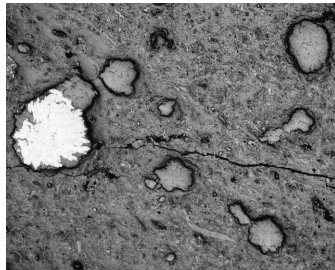
Анализ пустотного пространства и вещественного состава пород – коллекторов для нефти и газа



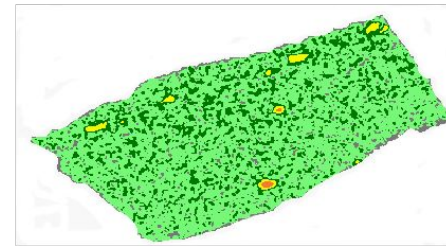
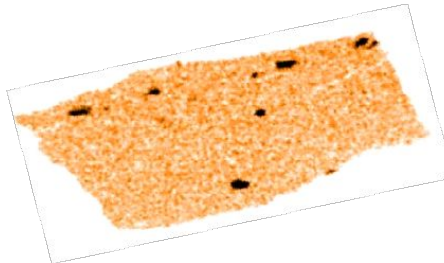
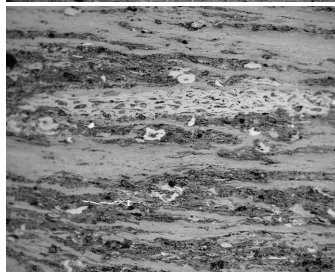
Пример исследования кернового материала трещиноватого карбонатного коллектора

Комплексирование РТ и оптической микроскопии на примере углей Хакасского месторождения

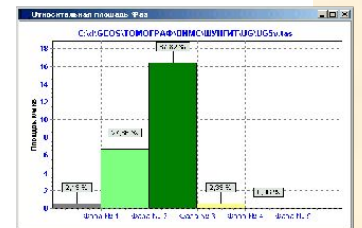
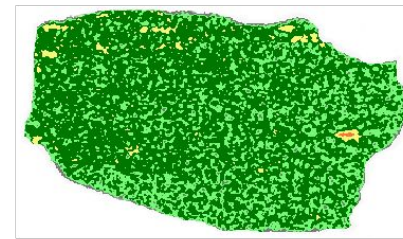
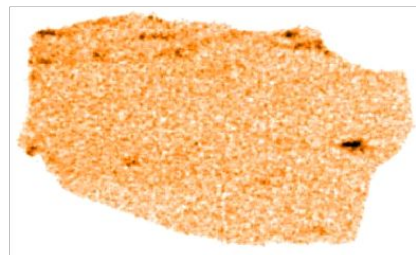
А



Б



В



А - неоднородный дюрено-клареновый с высоким содержанием минеральных примесей;
 Б - однородный дюреновый; В - однородный клареновый.

Справа налево: оптическая микроскопия, *отр.свет*, *увел.700*, *поле зрения 675x540 мкм*; томограмма; обработка по программе TomAnalysis и гистограммах процентного соотношения.

Установлено: 1-ая группа микролитотипов; средняя зольность однородных дюреновых и клареновых углей не превышает 2,35%, тогда как у неоднородного дюрено-кларенового угля составляет 25-27%.

Значимые минеральные примеси – пирит и сидерит.

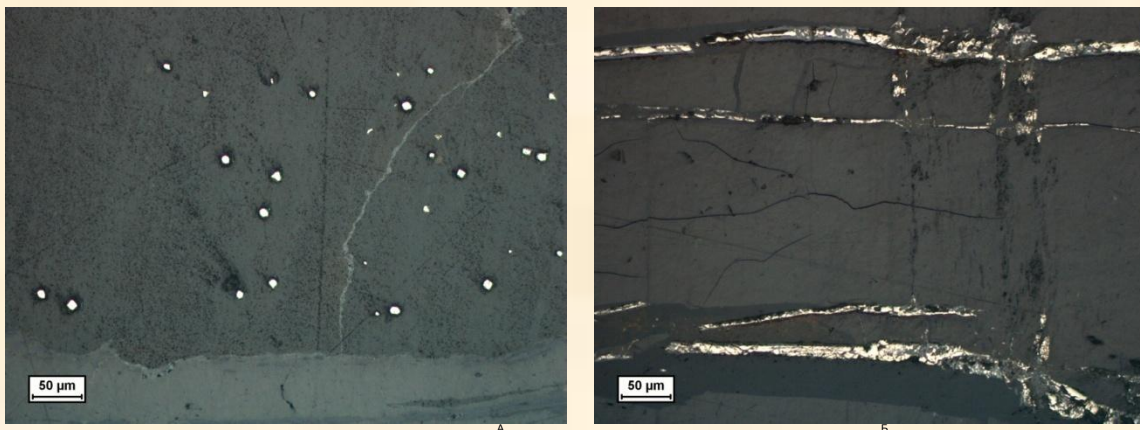
Рентгеномографическое исследование углей – выделение фаз и типизация углей

Тип угля	Выделенные фазы, их α_0 (Al- α_0) и содержание, в %							
	Дюрено- клареновый	<0,15	0,22-0,25	0,32-0,45	0,53-0,56	–	0,96-1,20	2,20-2,29
5%		10%	60%	7-9%		10%	5%	0,5%
Дюреновый	<0,15	0,19-0,21	0,49-0,59	–	0,89-0,95	1,18	2,19	–
	<0,15	0,17-0,18	0,23-0,31	–	0,71-0,94	–	2,14	–
	<0,15	0,17-0,20	–	0,45-0,48	–	–	–	–
	<0,15	0,2-0,23	–	–	–	–	–	–
	<0,15	0,2-0,22	0,37-0,40	–	0,90	–	–	–
	5-14%	58-90%	1-2%		0,1-3%	0,1-0,2%	0,1-0,2%	
Клареновы й	<0,15	0,17-0,19	0,21-0,28	0,56-0,59	–	–	–	–
	2%	28%	68%	2%				
Минералы, мацералы	поры, микро- трещины	мацералы		минеральные примеси				
		випринит, инертинит и эксинит	микрок-ты группы випринита	слоистые алюмосил икаты	кварц	кальцит	сидерит	суль фиды

Минерал	Содержание, %	Размер, мм		
		мин.	средн.	макс.
сульфиды	<0,5	68	106	657
сидерит	5,0	27	63	597

*Основные
минералы-примеси
в углях
по «TomAnalysis»*

Комплексирование РТ и оптической микроскопии, исследование распределения сульфидов (пирита) в углях Кузбасса



Мелко-тонкокристаллический пирит I генерации (а); марказит-пиритовые прожилки (б).
Отраженный свет, николи параллельны; увел. x 200.



Пирит I-генерации (красное) и пирротин (сиреневое) в углях,
рентгенотомография (томограмма, обработка по «TomAnalysis» и гистограмма соотношения фаз, в %).

Морфоструктурные характеристики пирита в углях

Гранулометрический состав пирита, отн. %

Кл. крупности, мм	Пирит (1), %		Пирит (2), %	
	количественный	массовый	количественный	массовый
- 0,5 + 0,25	0,00	0,00	0,00	0,00
- 0,25 + 0,125	0,00	0,00	0,00	0,00
- 0,125 + 0,074	0,24	16,40	0,06	7,56
- 0,074 + 0,044	1,12	27,30	0,21	9,93
- 0,044 + 0,022	3,65	27,84	2,27	34,05
- 0,022 + 0,01	10,54	18,92	8,19	28,91
- 0,01 + 0,005	16,71	6,59	17,18	13,33
- 0,005 + 0	67,75	2,97	72,11	6,22

Средний размер пирита **6 мкм (0,006 мм)**;
 масса пирита менее 5 мкм (0,044 мм) составляет **0,056%**.

Основная масса минерала сосредоточена в классах крупности -0,074+0,044; -0,044+0,022; -0,022+0,01мм.

В более тонком материале пирита - менее 13%.

Оптимальная крупность дробления для максимального извлечения сульфидов **0,044 мм**.

Гистограммы гранулометрического состава пирита

Количественный состав



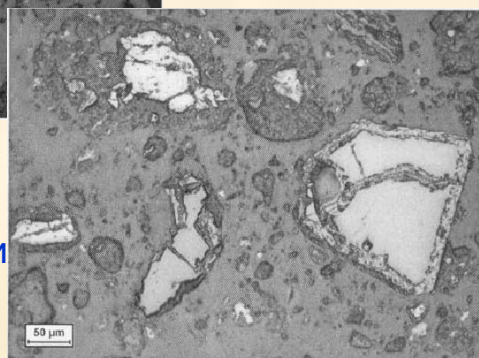
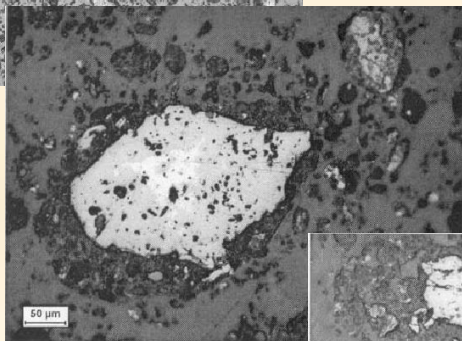
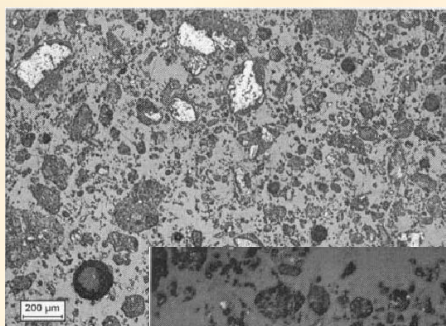
Массовый состав



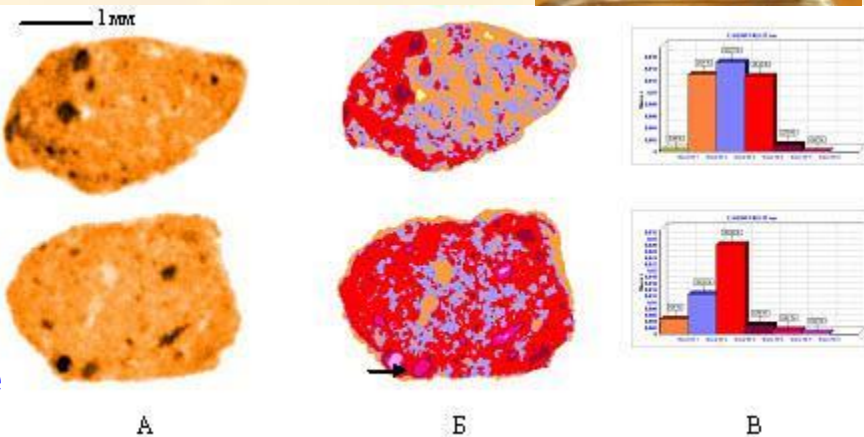
Техногенное минеральное сырье, прогноз свойств на примере Fe-содержащих металлургических шлаков



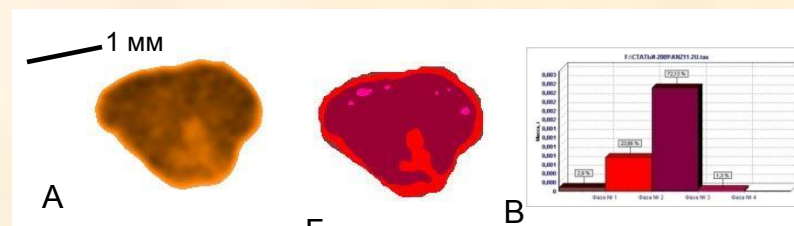
Характер распределения (эвтектические колонии), гетерогенное строение основных рудных фаз показывают, что физические методы обогащения будут неэффективны, целесообразно использовать химические методы



Форма выделения магнетита, (искусств. полиров. шлифы, николи).

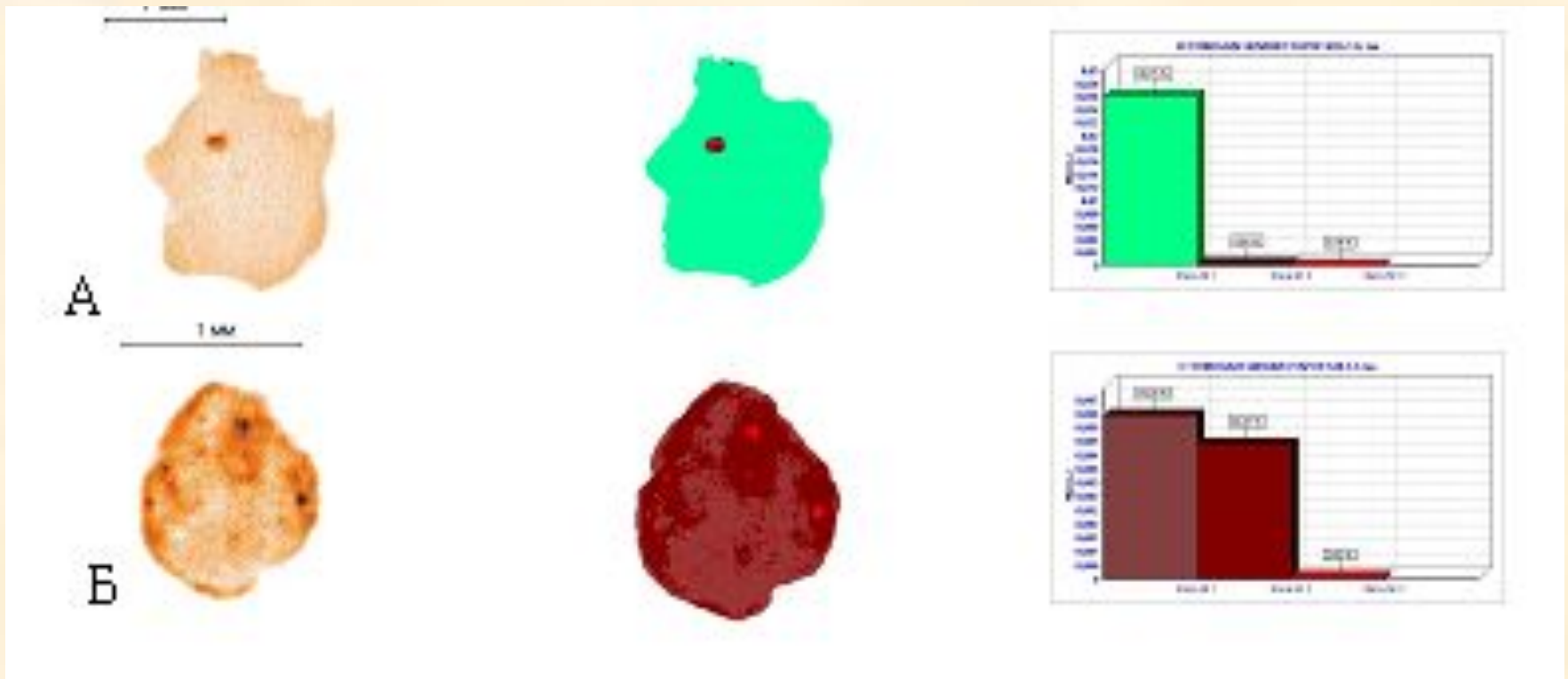


Томограммы агрегатов магнетита: оливин – оранжевое, две фазы магнетита -голубое и красное, две фазы треворита -коричневое и малиновое, Ni в треворите – сиреневое (образец сравнения - Al) .



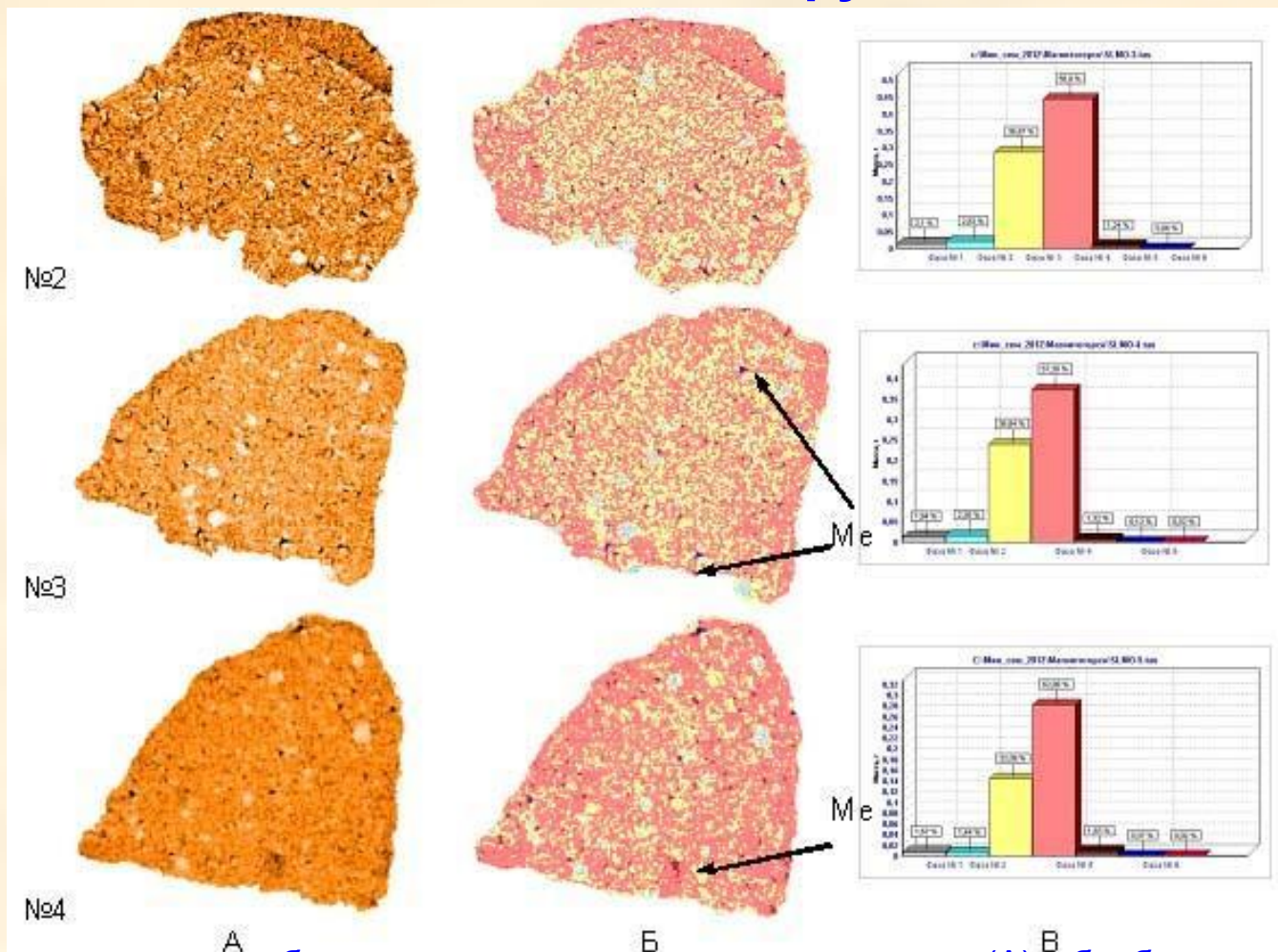
Томограмма: кристаллы магнетита в Fe-шлаках (красное и фиолетовое – магнетит)

Ni-содержащие металлургические шлаки



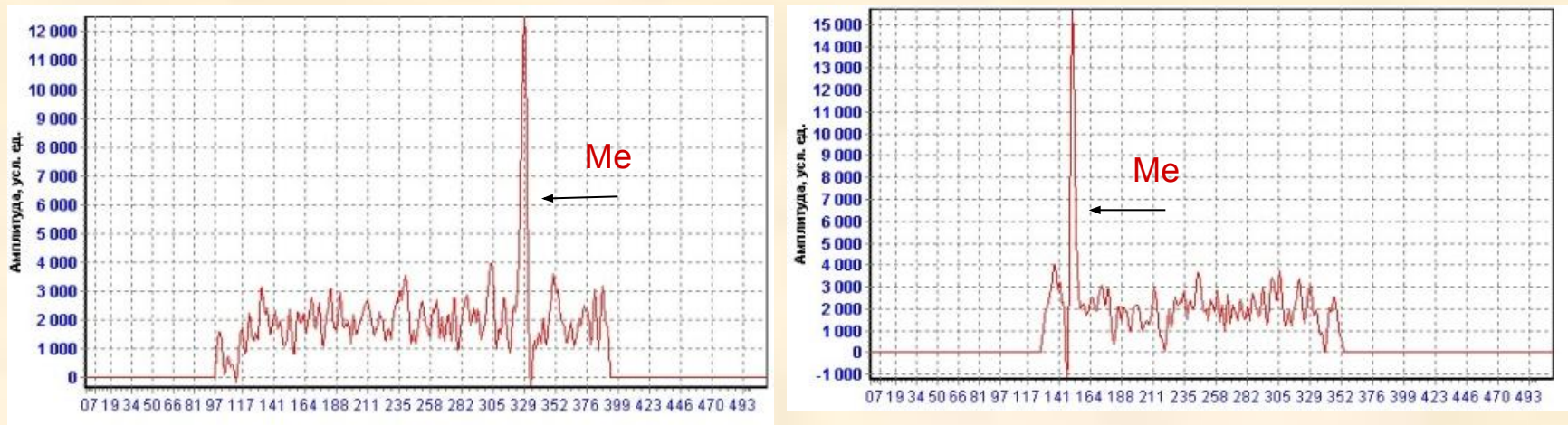
Томограмма, обработка по «TomAnalysis» и их % соотношение:
осколок стекла черного цвета с двойной фазой треворит-магнезиоферрита в ореоле оксидов железа (А)
и агрегат треворита буро-коричневого цвета, содержащий отдельные зерна магнезиоферрита (Б).

РТ исследование окомкованных хвостов обогащения колчеданных руд



РТ окомкованных хвостов обогащения колчеданных руд: томограмма (А); обработка по программе TomAnalysis –разделение на фазы (Б) и гистограмма процентного соотношения выделенных фаз (В) (микропоры – серое, гипс – голубое, кварц – желтое, тонкокристаллический пирит – лососевое, сфалерит – коричневое, халькопирит – синее, металл (Cu), показано стрелкой – малиновое.

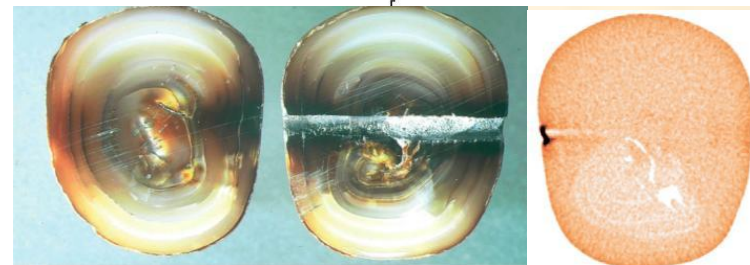
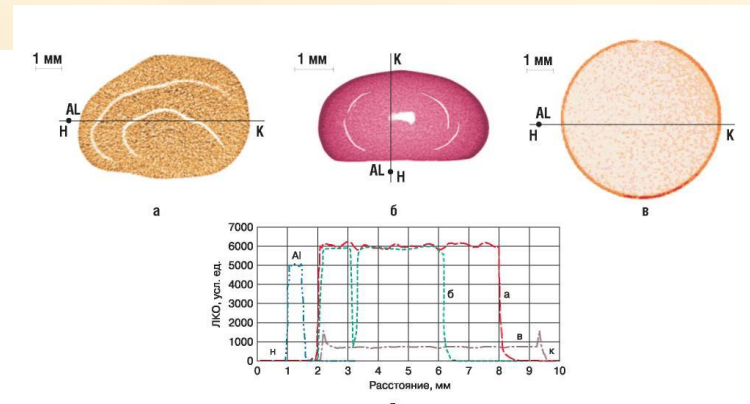
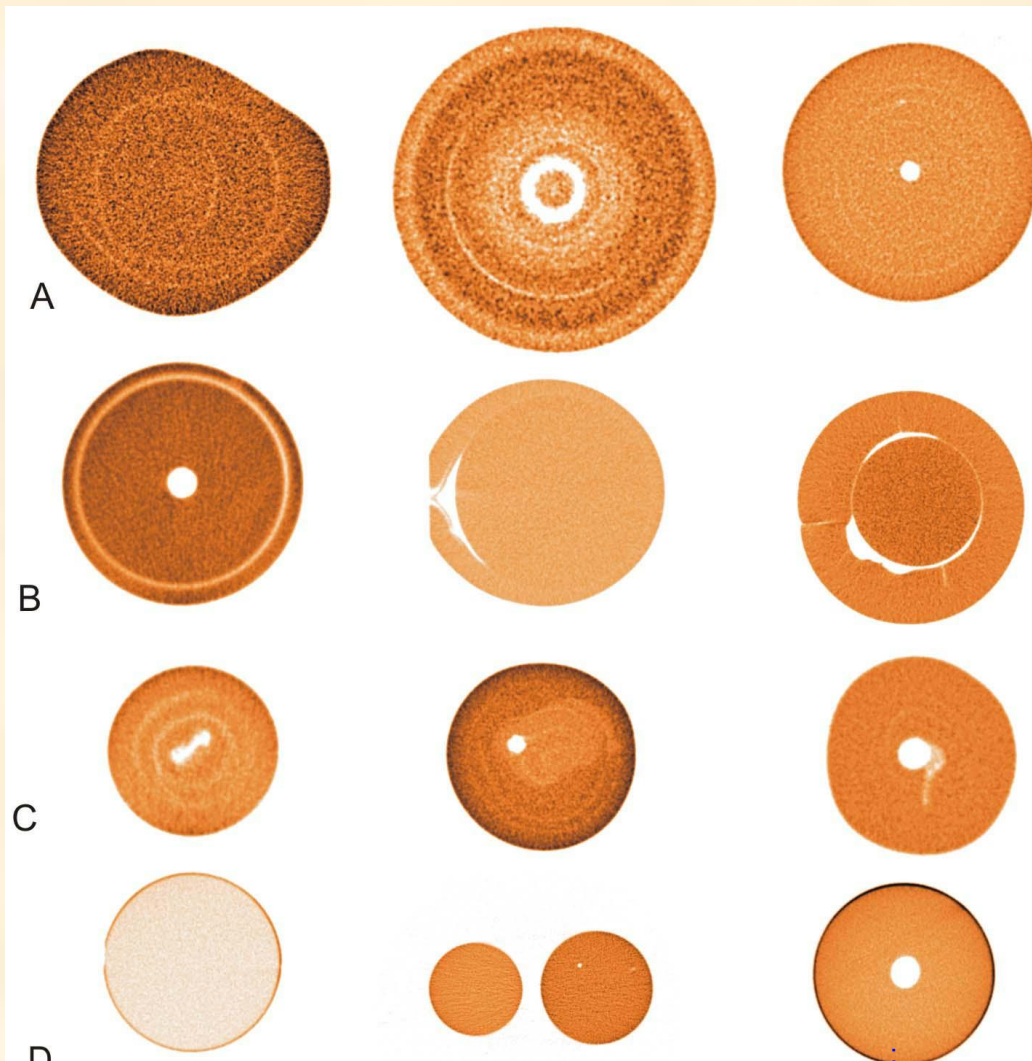
РТ исследование окомкованных хвостов обогащения колчеданных руд



Графики распределения амплитуды ЛКО через место локализации металлической фазы (Cu)

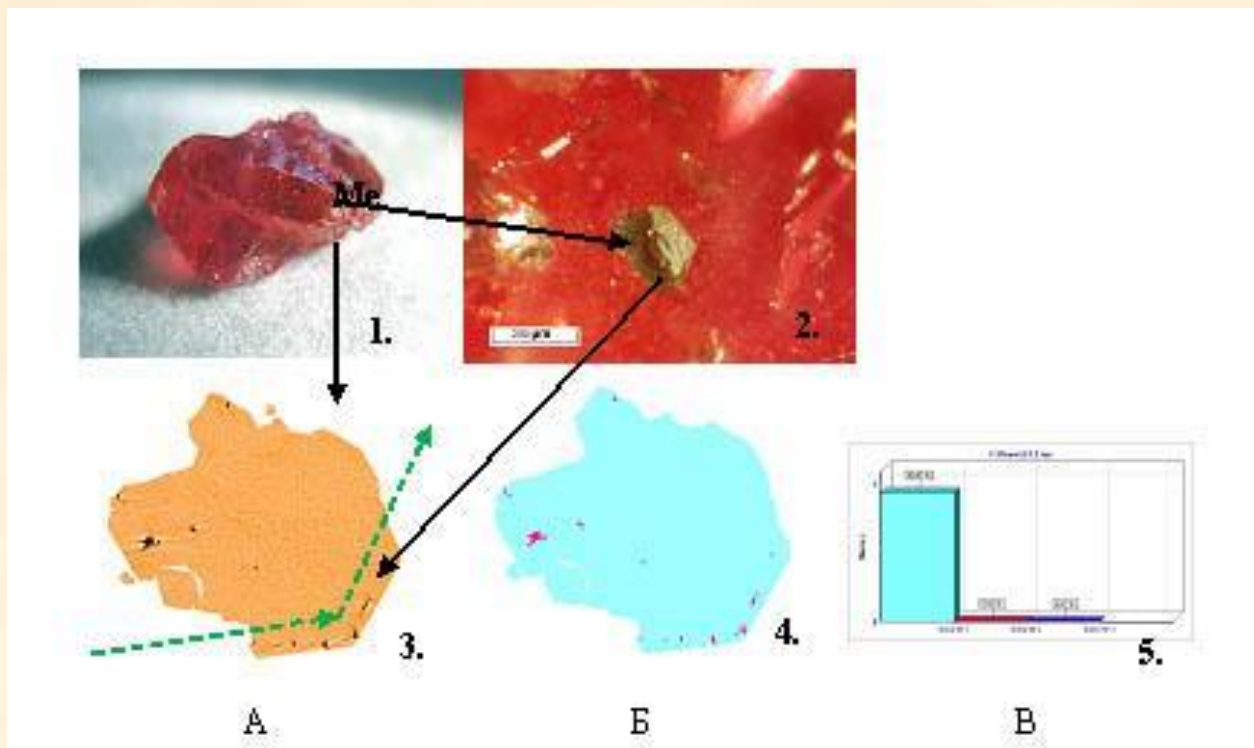
Метод рентгеновской микротомографии в исследовании техногенного минерального сырья – металлургических шлаков, окатышей – позволяет выявлять фазовую неоднородность, характер распределения и размер рудных техногенных фаз, их количество в шлакообразующей массе, устанавливать присутствие полезных фаз, давать экспрессную прогнозную оценку их технологических свойств при вовлечении во вторичную переработку.

Томограммы жемчуга и его имитаций



A — натуральный; **B** — культивируемый «ядерный»; **C** — культивируемый «безъядерный»;
D — имитации жемчуга: 1) пластмасса, 2) «Майорка», стекло, видны пузырьки воздуха, 3) «Шелл» (shell-pearl), когда на ядро, выточенное из створки моллюска, нанесен слой лака жемчужной эссенции (внешний тонкий слой, отличающийся высокими значениями ЛКО); **E** — Кешу-жемчуг, **F** — Мабэ, составной жемчуг,

Геммологические объекты – неdestructивное исследование включений в кристалле флюсового рубина фирмы Chatham с целью диагностики природных и синтетических рубинов

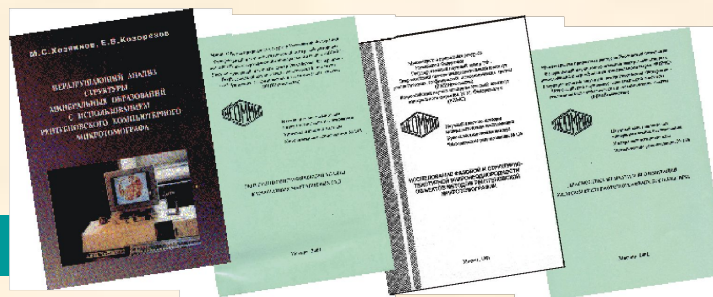


1) общий вид (размер кристалла 1,5 x 1 x 0,5 см), включения металлических частиц (Me); 2) макроизображение металлических частиц; 3) рентгенотомограмма флюсового рубина (зеленый пунктир – локализация инородных частиц вдоль грани дитригональной призмы кристалла корунда); 4) разделение на фазы по программе TomAnalysis; д) гистограмма их процентного соотношения: корунд (Al_2O_3) –голубое, инородные включения (в т.ч. флюса) – красное - 0,28-0,52 масс.% Fe(?), синее – 0,01масс.% Pb(?), обр. Минералогического музея РАН им. А.Е.

Ферсмана

Научным советом по методам минералогических исследований (НСОММИ) утверждено 4 Методических рекомендации в качестве отраслевых нормативных документов

- **Методические рекомендации НСОММИ № 159**
«Прогнозная оценка обогатимости углей минералогическими методами (оптическая микроскопия и рентгенотомография)», 2012
- **Методические рекомендации НСОММИ № 103 НСАМ, НСОММИ**
«Выбор рационального комплекса аналитических и минералогических методов при изучении вещественного состава железомарганцевых конкреций ЖМК), кобальтоносных марганцевых корок (КМК), глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС) при проведении ГРР», 2012
- **Методические рекомендации НСОММИ № 146**
«Рентгенотомографический анализ карбонатных марганцевых руд», 2001
- **Методические рекомендации НСОММИ № 145** *«Диагностика жемчуга и его имитаций методом рентгенотомографического анализа»*, 2001



Спасибо за внимание!

Спасибо за внимание!