



ГБОУ ВПО Международный университет  
природы, общества и человека Дубна



ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт  
минерального сырья им. Н.М.Федоровского

## **СОВРЕМЕННАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ МИКРОТОМОГРАФИЯ ГЕОМАТЕРИАЛОВ**

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

# 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.

## 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; Комpton-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.
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),
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).***

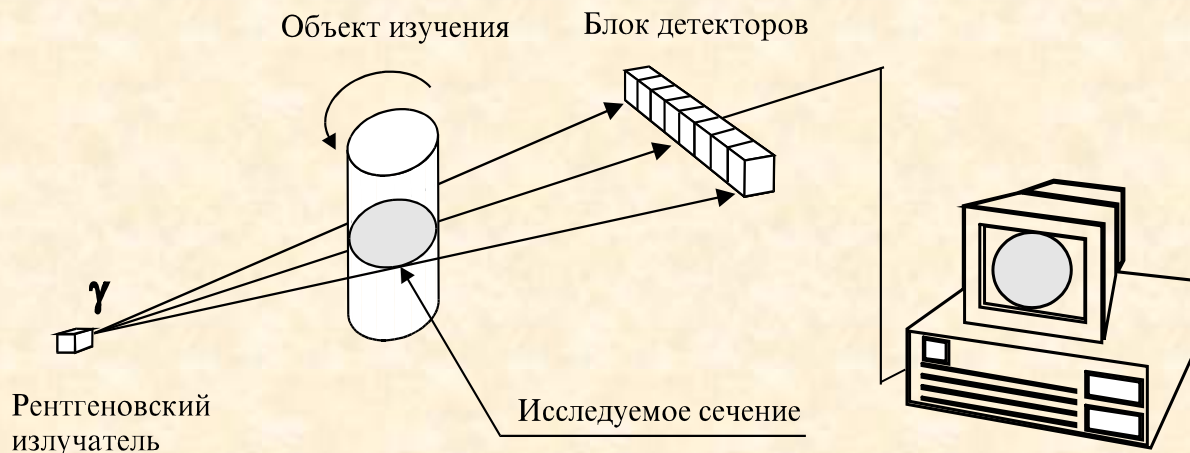
Системные исследования горных пород и руд в России начаты с 1992г.

Хозяинов М.С., Вайнберг Э.И. Вычислительная микротомография – новая информационная технология неразрушающего исследования внутренней микроструктуры образцов геологических пород // Геоинформатика, 1992. №1. С. 42-50.

Доложены на Международной конференции «Геофизика и современный мир», Москва, МГУ им. М.В.Ломоносова, август 1993 г.

Хозяинов М.С., Руб А.К., Козорезов Е.В. Использование рентгеновской вычислительной томографии в прикладной минералогии // ДАН, 1995. Т.344. № 4. С.516-519.

# Отечественная РТ аппаратура - микромограф ВТ-50-1 «Геотом» (ООО «Промышленная интроскопия»), 1992 г.

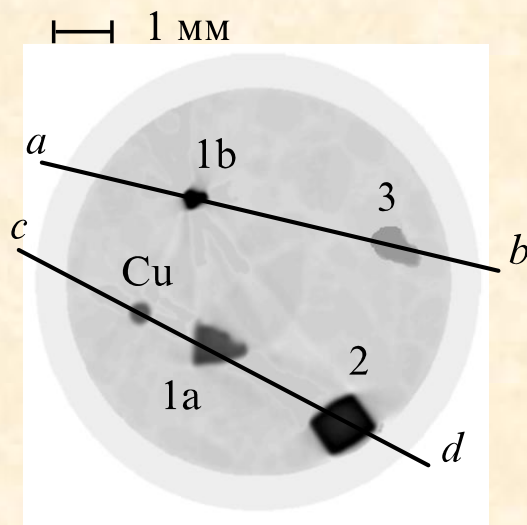
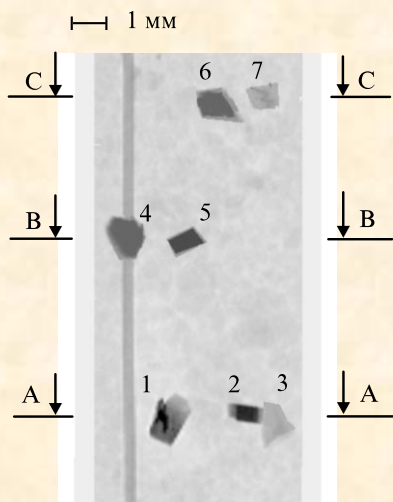


## Характеристики микромографа ВТ-50-1 «Геотом»

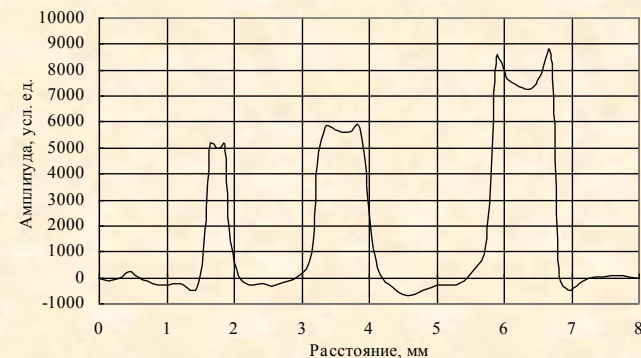
Диаметр исследуемого образца	до 15 мм
Высота исследуемого образца	до 80 мм
Диаметр рабочего поля (4 режима съемки)	2,5; 5; 10; 15 мм
Толщина исследуемого слоя	10 мкм
Минимальный шаг послойного сканирования	5 мкм
Чувствительность по ЛКО	около 1%
Геометрическая чувствительность	5 мкм
Пространственное разрешение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



# Порядок проведения РТ-анализа



Профиль ЛКО по сечению а-в



Профиль ЛКО по сечению с-д

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

Параметры режимов сканирования микротомографа «Геотом»

Режим сканир.	1	2	3	4
Диам.зоны сканир., мм	15	10	5	2,5
Увеличение	x12	x18	x35	x70

# Расчет основных значений для анализа томограмм

Величина линейного коэффициента ослабления рентгеновских лучей (ЛКО)  $\mu$ , см<sup>-1</sup> любого вещества зависит от химического состава и плотности вещества, а также от энергии гамма-излучения:

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

где  $\mu_m$ , – массовый коэффициент ослабления гамма-излучения рассматриваемого вещества при той же энергии, см<sup>2</sup>/г,  $\rho$  - плотность вещества, г/см<sup>3</sup>.

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

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

$l$  – размер ИО по направлению излучения

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

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



## 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

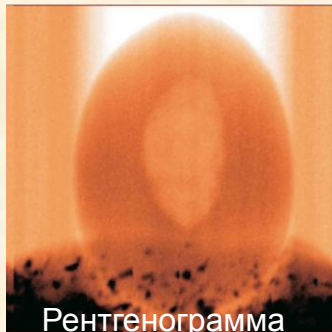
*Метод можно использовать для:*

- 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

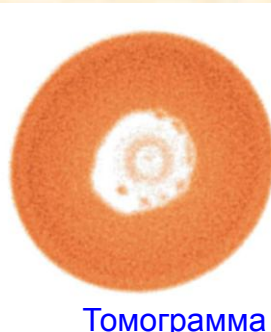


# Ограничения метода РТ:

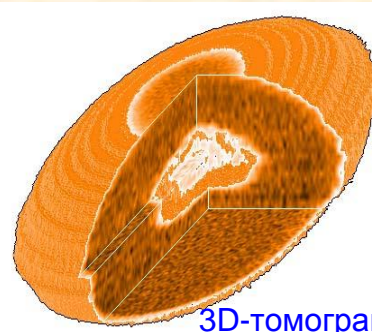
- габаритные размеры образца не должны превышать размеры прямого цилиндра высотой 100 мм и диаметром 15 мм (конструкционные особенности прибора),
- образец не должен содержать значительного количества магнитного материала,
- интегральная толщина объекта вдоль прямой по любому из направлений плоскости 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

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):

$\alpha_x = \text{ЛКО фазы} / \text{ЛКО ос}$  сравнивается с  $\alpha_T = \text{ЛКО фазы} / \text{ЛКО ос}$

$$\alpha_x = \mu_{\text{эфф}}^x / \mu_{\text{эфф}}^{\text{ос}} \quad \text{и} \quad \alpha_T = \mu_{\text{эфф}}^x / \mu_{\text{эфф}}^{\text{ос}}$$

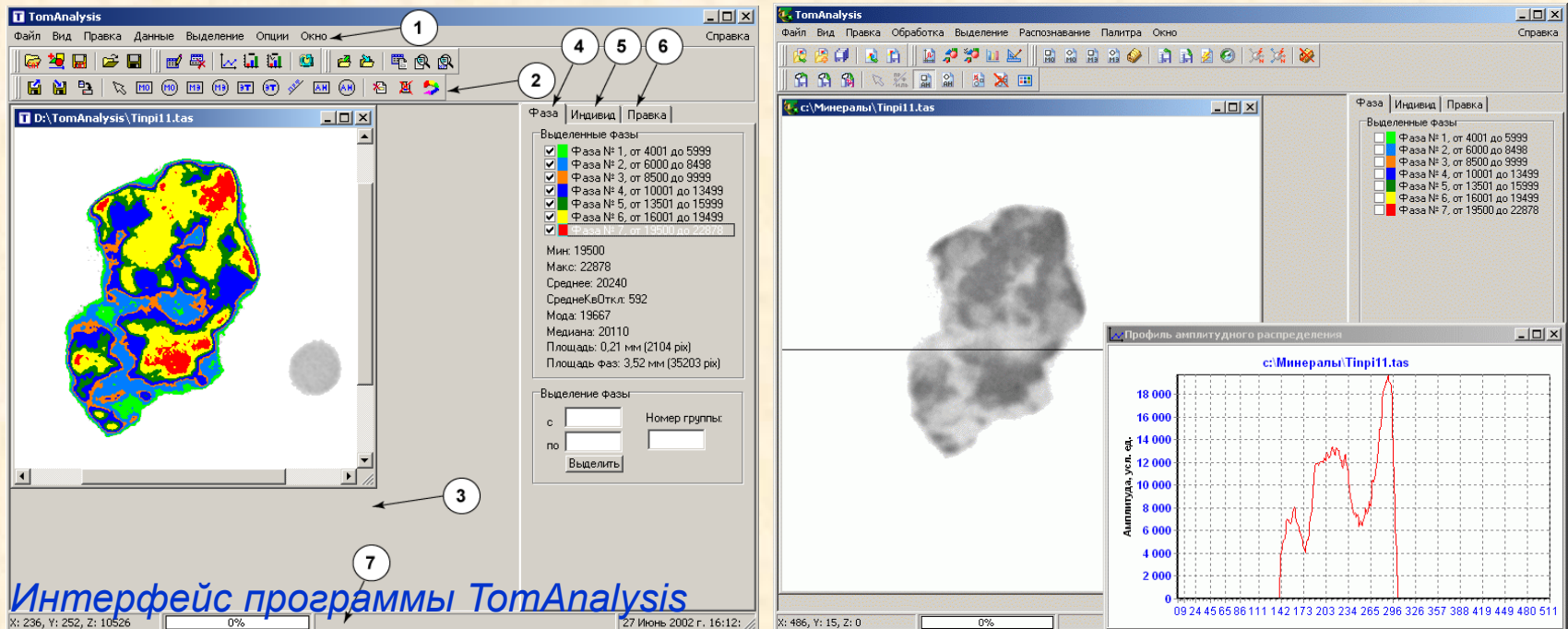
Использование ОС обеспечивает воспроизводимость исследований, точность вычисления эффективного ЛКО, делает возможным расчет эффективных ЛКО для ИО и ОС при одинаковых условиях с учетом их одновременного размещения в зоне сканирования, позволяет уменьшить погрешность вычисления этого отношения.

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»



Интерфейс программы 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.

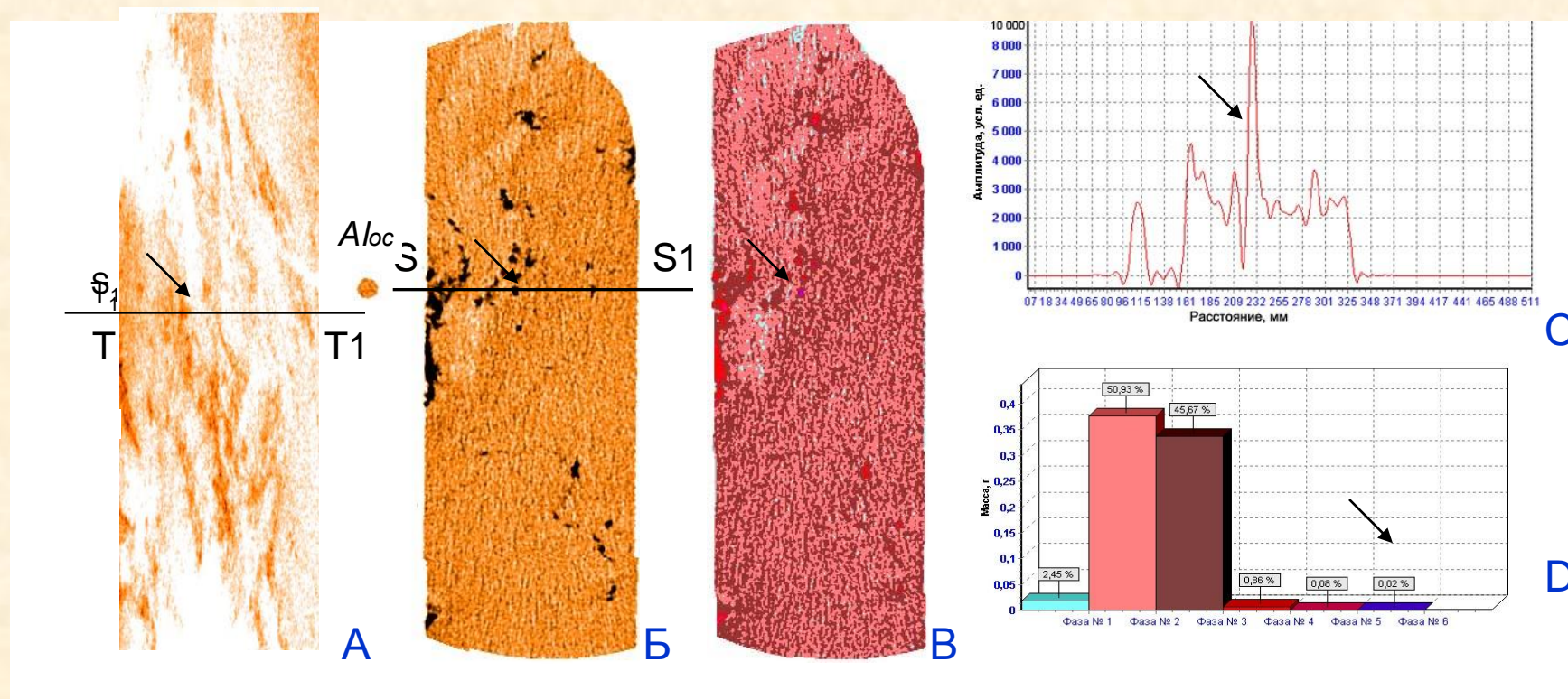
Морфометрические параметры						
	мин.	макс.	Ср.	СркВОткл.	Самм.	
<=3.0E+002						
Площадь	900.00	900.00	900.00	0.00	2700.00	
Длина	42.43	42.43	42.43	0.00		
Ширина	42.43	42.43	42.43	0.00		
Периметр	163.71	163.71	163.71	0.00		
Удлинение	1.00	1.00	1.00	0.00		
Фактор формы	0.39	0.39	0.39	0.00		
Компактность	0.50	0.50	0.50	0.00		
Масса	4.500E-005	4.500E-005	4.500E-005	0.000E+000	1.350E-004	
>3.0E+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	338.41	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	1.685E-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	

Количественная гистограмма  
Количественная и массовая гистограмма

# Последовательность выполнения операций РТ- исследования



# Методика РТ- исследования



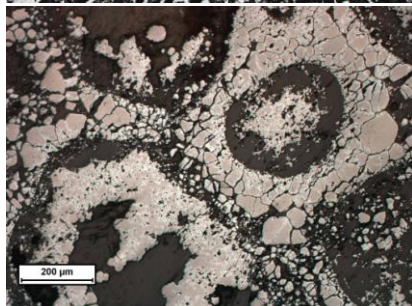
А - рентгенограмма, Б - томограмма по сечению Т–Т1 (образец сравнения (ОС) -алюминий марки А97 по ГОСТ 11069-85 Al),

В - обработка томограммы по программе TomAnalysis,

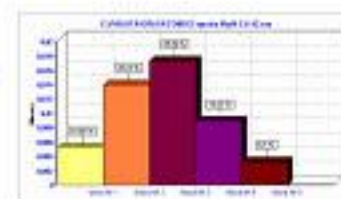
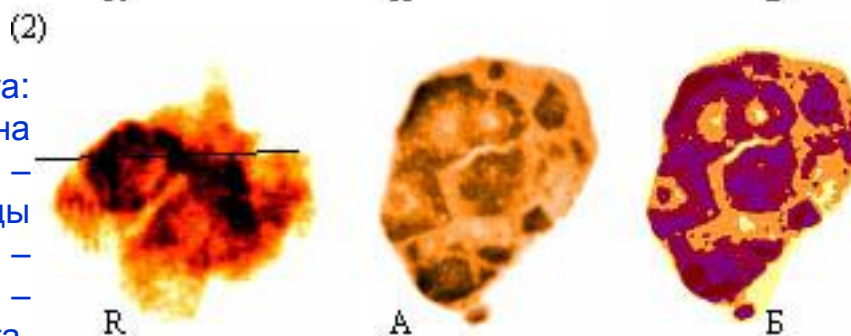
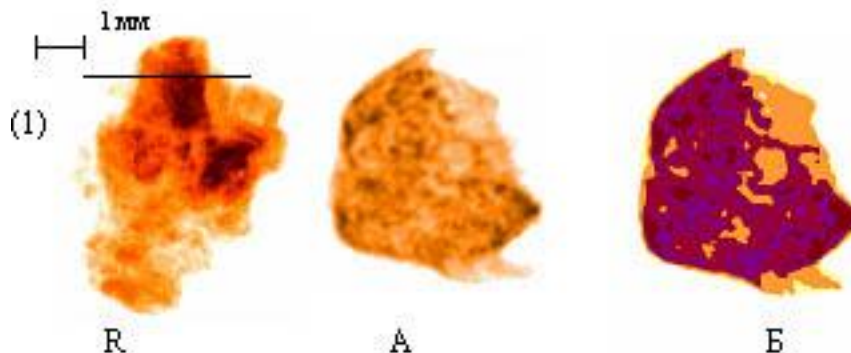
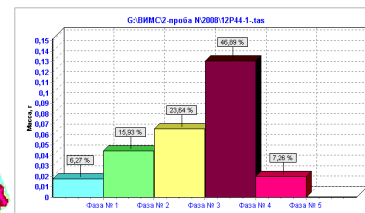
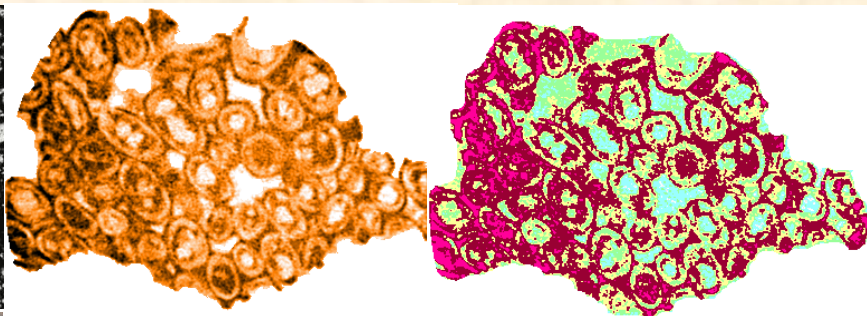
С - гистограмма % соотношения выделенных фаз,

Д - построение профиля распределения ЛКО по линии S – S1.

# 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**



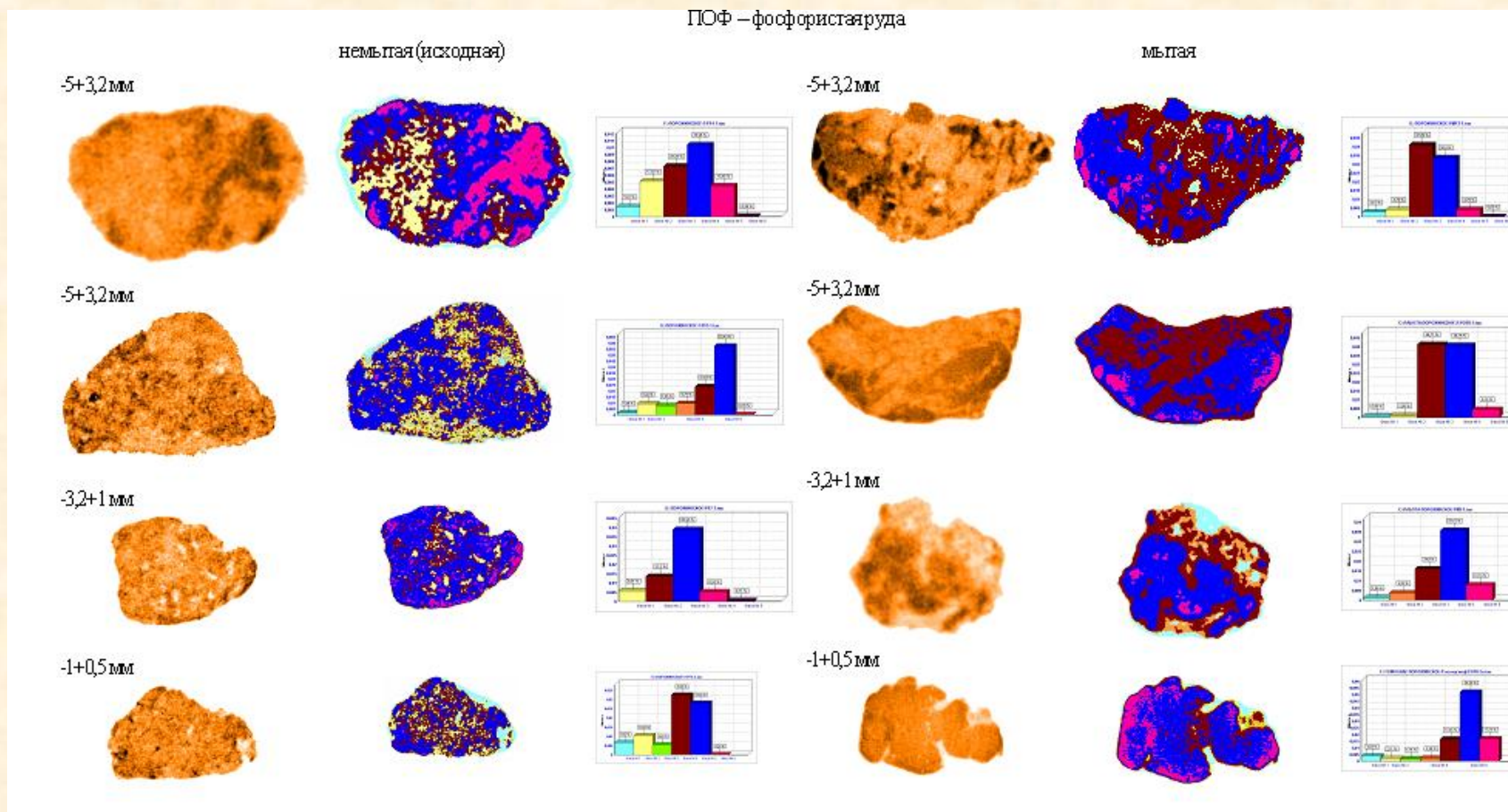
# Рентгеномографическое исследование железных руд

На примере Тагарского месторождения, технологическая проба

Проба		Выделяемые фазы и их $\alpha$ , (к А1 – 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	гидрогетит	гетит	гематит-1	гематит-2	гематит-3	магнетит-1,(маггетит)		магнетит-2		
				гидроксиды железа		гематит			магнетит				

# 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).

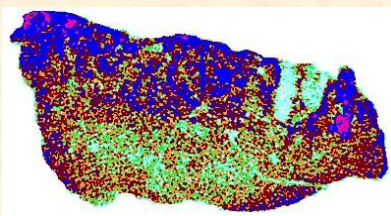
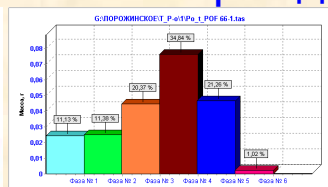
# Выявление особенностей технологических свойств руды - установлен характер срастания апатита с опалом и кварцем

## Порожинское месторождение окисленных марганцевых руд



1 мм

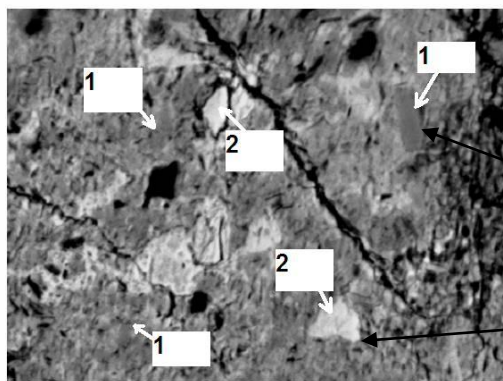
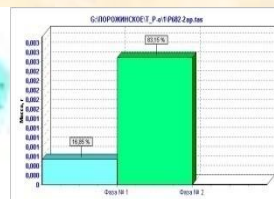
Рудный железо-марганцевый агрегат с тонкой вкрапленностью апатита



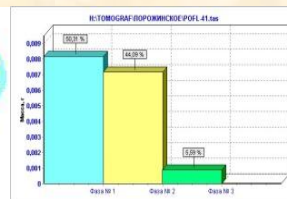
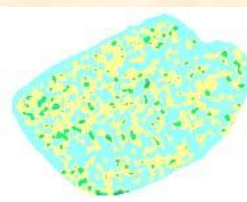
Сросток апатита с опалом и кварцем («маскирующая» апатит оболочка опала на поверхности, голубое)



1 мм



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



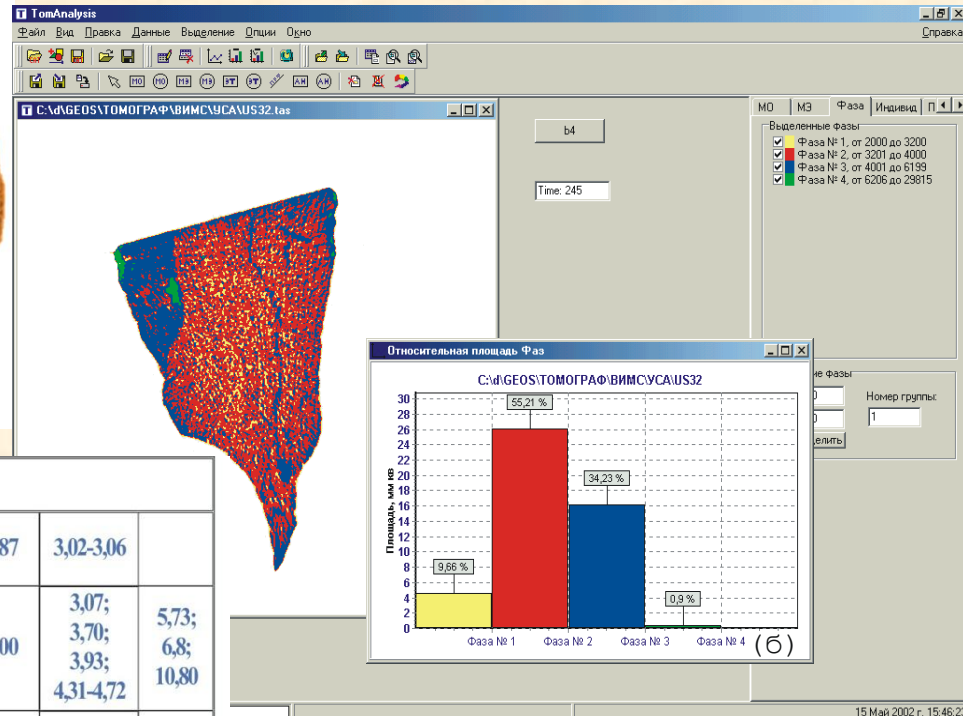
апатит-кварц-опаловый агрегат

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

# 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.*



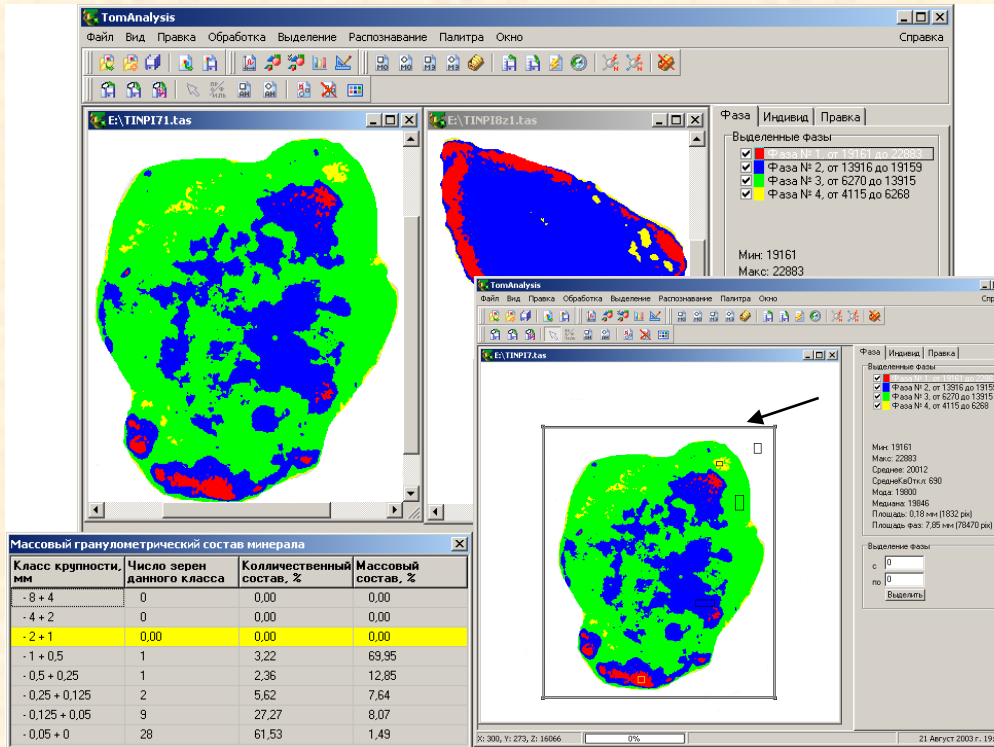
в руде выделена фаза  
силикатов марганца  
(желтый цвет)

Кл.круп., мм	Выделяемые фазы и их $\alpha_s$ (Al- $\alpha_s$ )								
	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 алюмо- силикаты	кальцит, марганцовис- тый кальцит	мангано- кальцит-1	мангано- кальцит-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

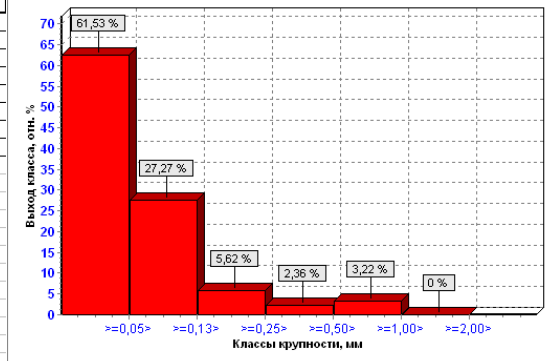
# Анализ морфоструктурных особенностей и прогноз технологических свойств руды



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

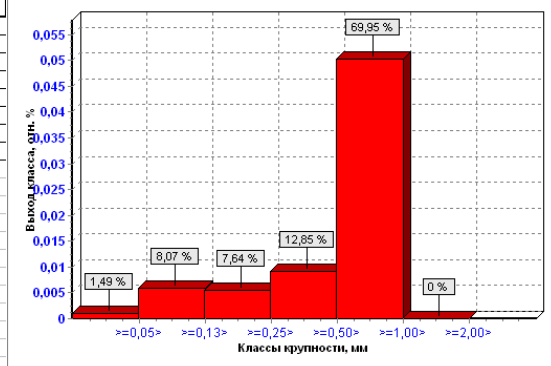
КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ РОДОХРОЗИТА (отн. %) И ГИСТОГРАММА ЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО КЛАССАМ КРУПНОСТИ

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

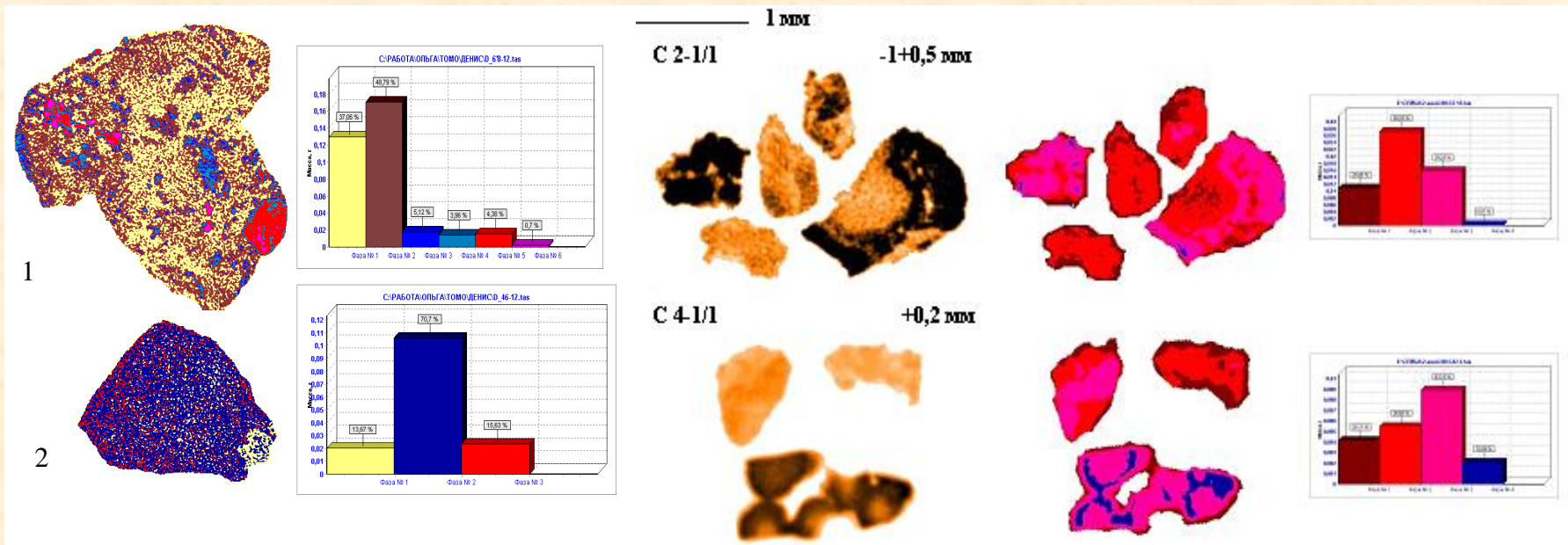
Кл. крупности, мм	Родохрозит
- 8 + 4	0,00
- 4 + 2	0,00
- 2 + 1	0,00
- 1 + 0,5	69,95
- 0,5 + 0,25	12,85
- 0,25 + 0,125	7,64
- 0,125 + 0,05	8,07
- 0,05 + 0	1,49



основной класс раскрытия родохрози́та I-генера́ции -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.

# Технологические свойства руды Сейбинского месторождения



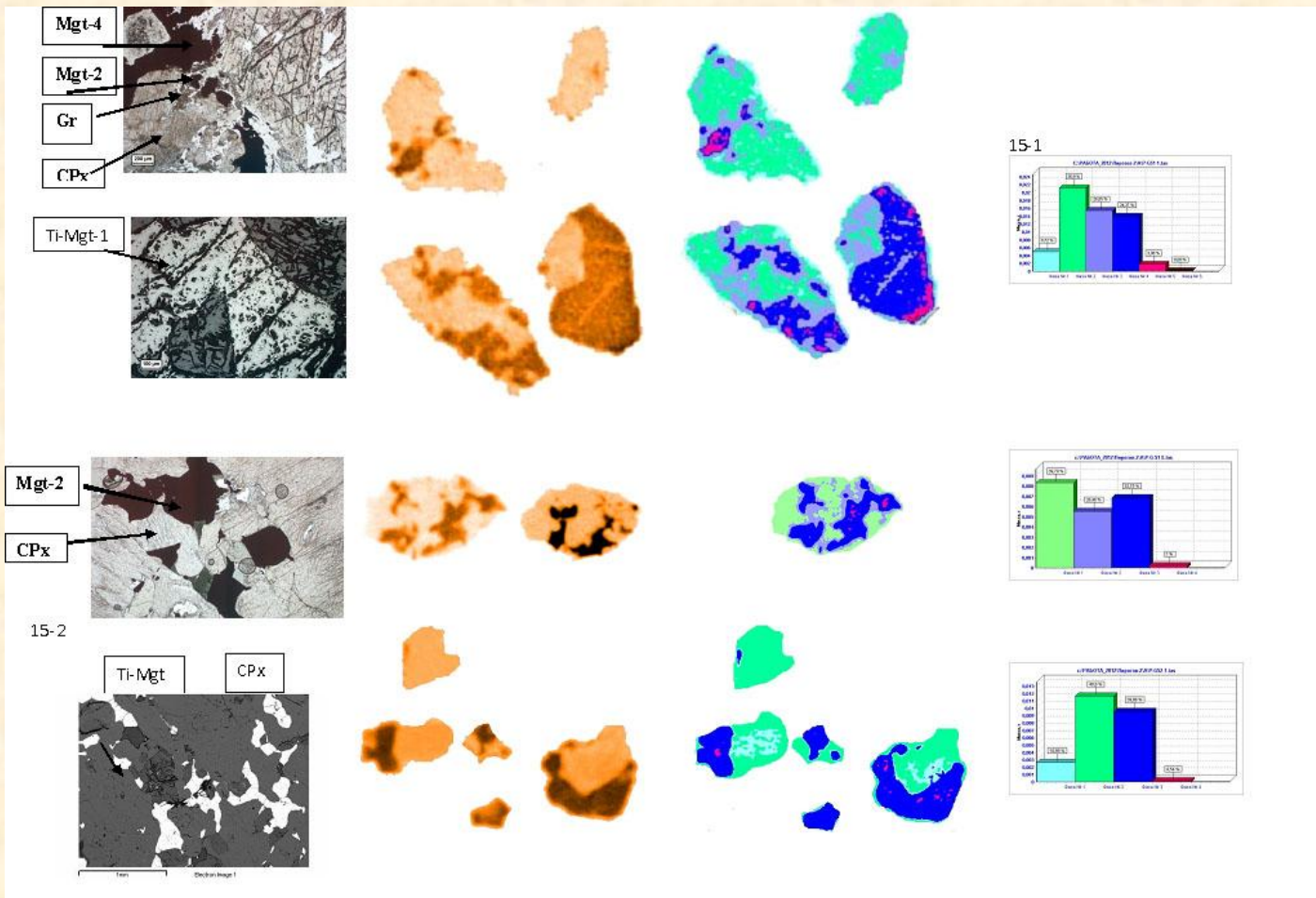
Исходная марганцевая руда (1,2) и классифицированные продукты (справа): томограмма, обработка по «TomAnalysis» и гистограмма % соотн. фаз:(желтое – породообразующие минералы, коричневое – гидроксиды марганца, красное – пиролюзит, малиновое, синее – псиломелан)

Внешне однородные (оболочка, скорлупа) агрегаты пиролюзит-псиломеланового состава

Практически равномерная тонкая вкрапленность кварца и гидроксидов железа в марганцевом агрегате (рис. 1) о невозможности избавиться от них физическими методами обогащения. Характер взаимоотношения непосредственно марганцевых фаз (рис. 2) определяет невозможность селективного разделения марганцевых минералов (это усугубляется и близостью их физических свойств). Взаимоотношения минералов в руде

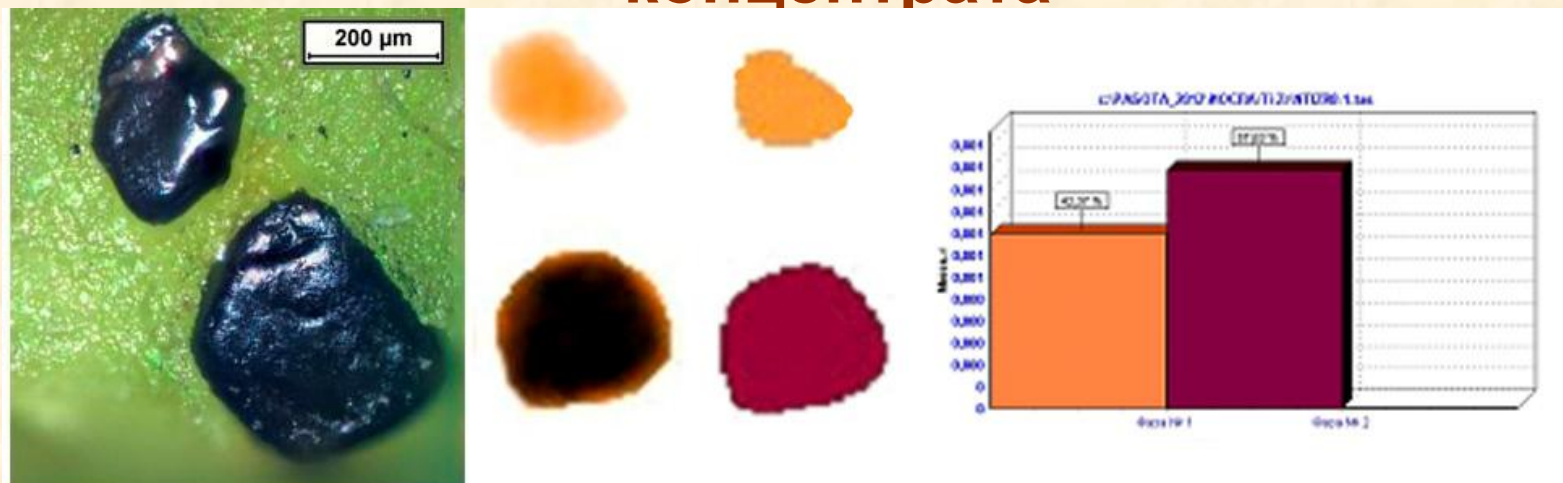
усложняются из-за породообразующих минералов, что делает невозможным селективное обогащение.

# 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 – герценит, ульвешпинель, ильменит, синее - титаноманнетит, магнетит – малиновое

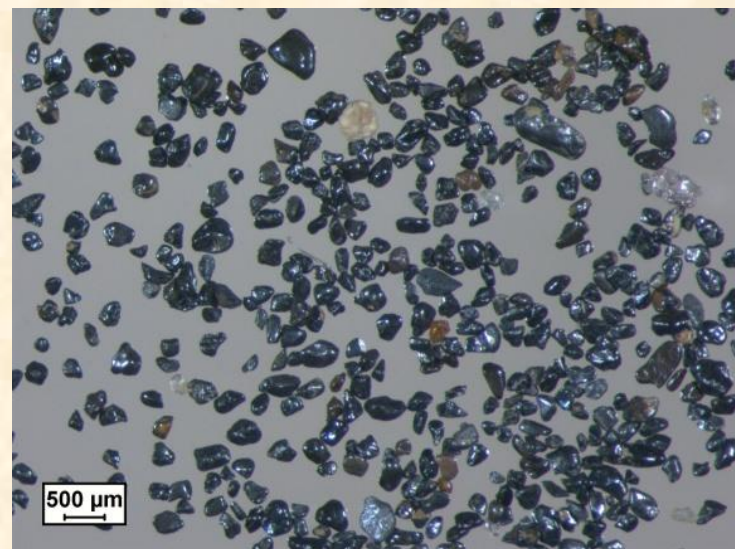
# Рентгенотомография зерен ильменитового концентрата



Визуально сходные зерна ильменита и псевдорутила

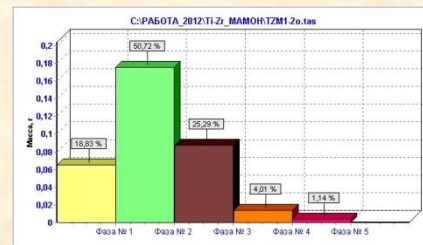
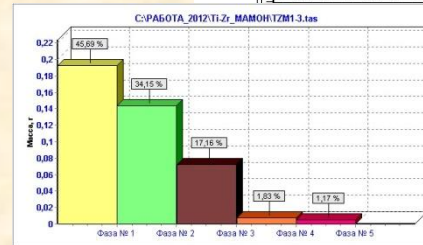
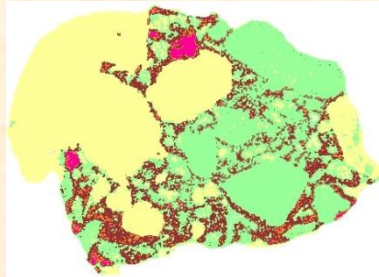
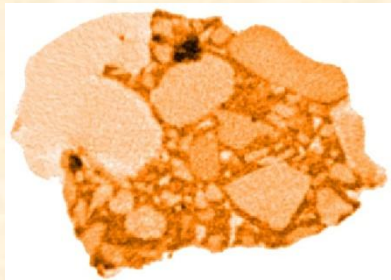
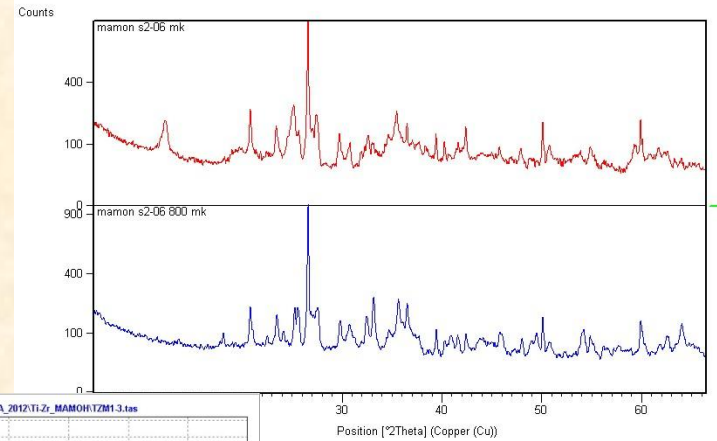
(Индия, ильменитовый концентрат):

А - фото, Б – томограмма, ее обработка по «TomAnalysis» и В – гистограмма % соотношения фаз; ильменит – малиновое, псевдорутил – оранжевое\

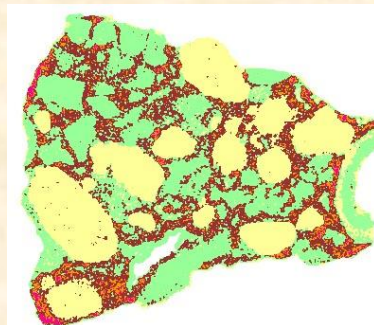
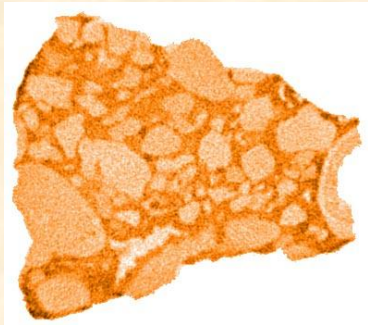




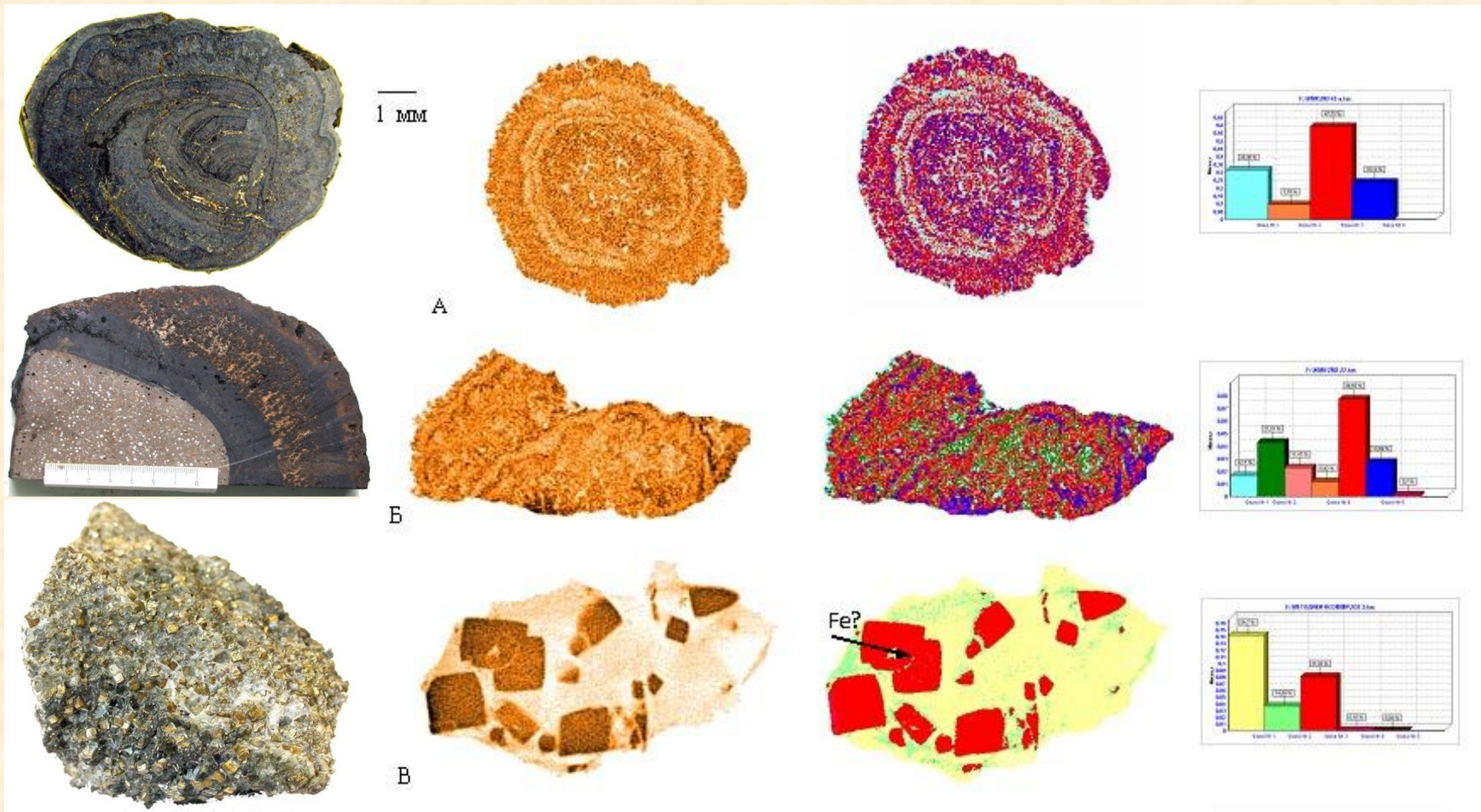
# Результаты РТ исследования тонкодисперсных титановых руд Воронежской области



Желтое – кварц,  
 глинистые минералы  
 Зеленое – полевые шпаты  
 Коричневое – рутил, анатаз  
 Рыжее – ильменит  
 Малиновое – магнетит



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

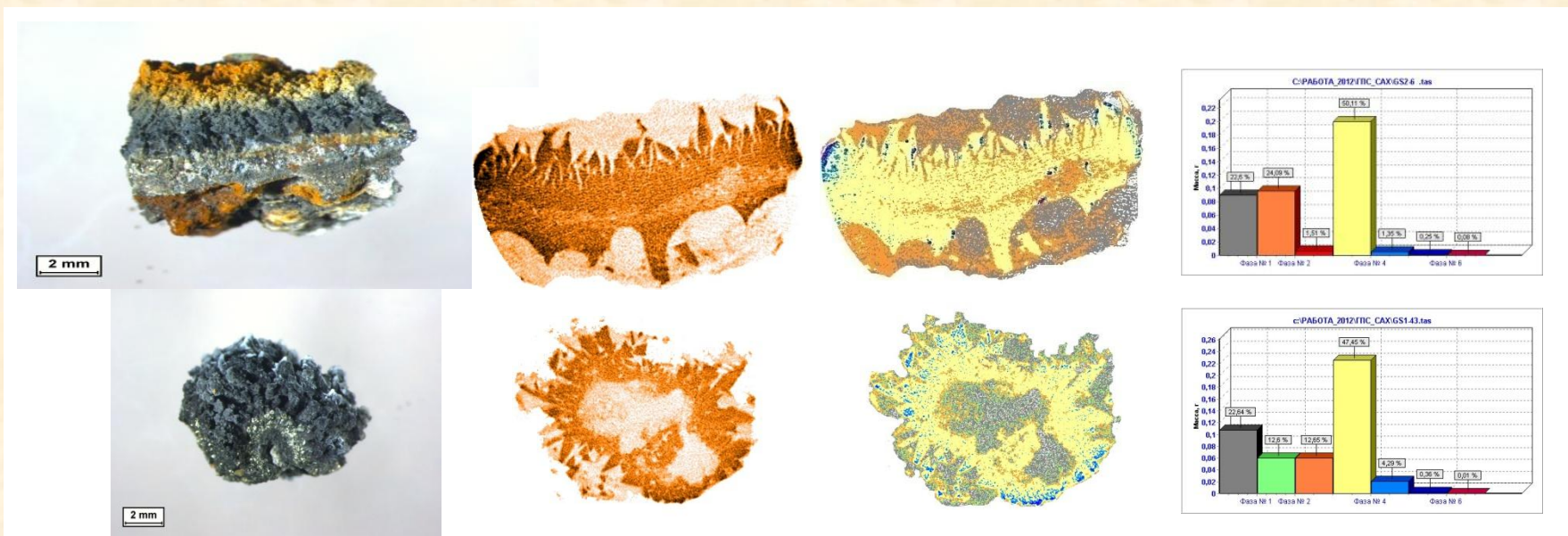


ЖМК – А , КМК – Б, ГПС – В,

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).

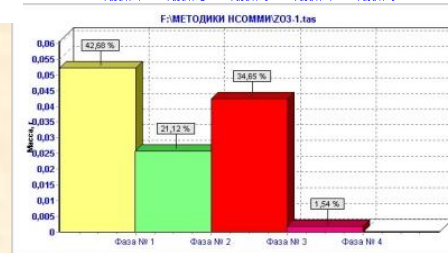
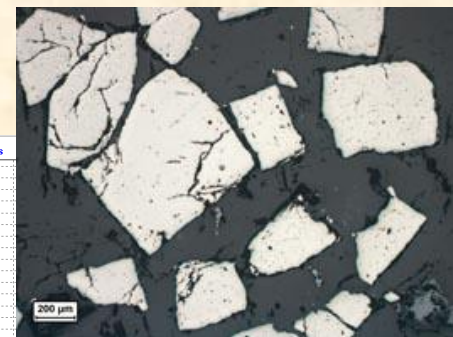
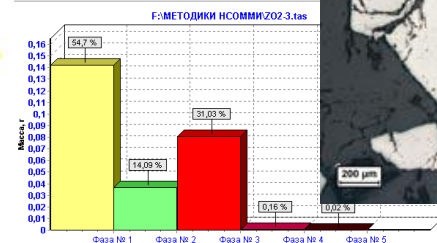
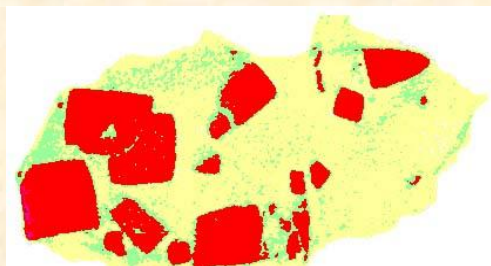
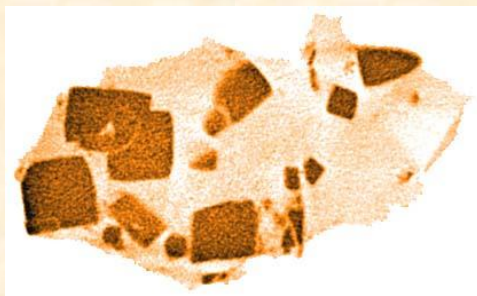
# Глубинные полиметаллические сульфидные руды (ГПС)

## Рентгенотомографический анализ

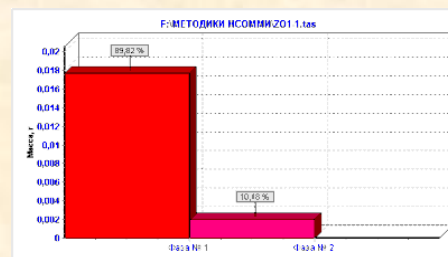


Рентгенотомография ГПС: серое – породообразующие минералы (гипс), зеленое - карбонаты меди (азурит, малахит), оранжевое - гидроксиды железа (гетит, гидрогетит), красное - пирит, желтое - халькопирит, синее - ковеллин, светло-синее - борнит, малиновое - халькозин, возможно куприт.

# Глубинные полиметаллические сульфидные руды



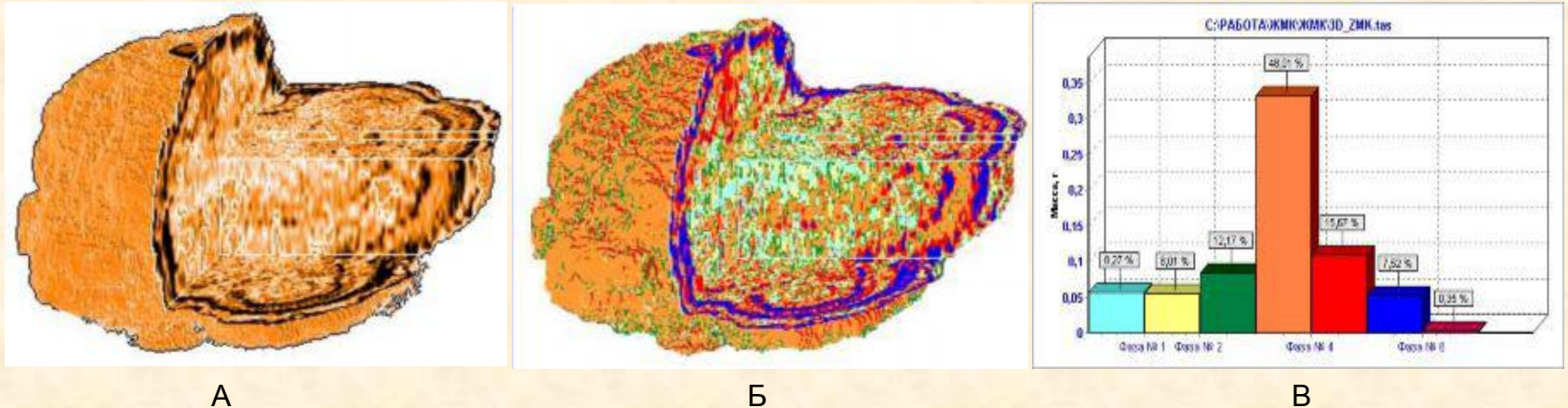
ГПС,  
отраженный свет,  
никели параллельны;  
увел. x 200



А - томограмма, Б - обработка по «TomAnalysis» и В - гистограмма процентного соотношения фаз (породообразующие силикаты: желтое – кварц, зеленое - плагиоклазы, оливин); красное – пирит, малиновое – пирротин

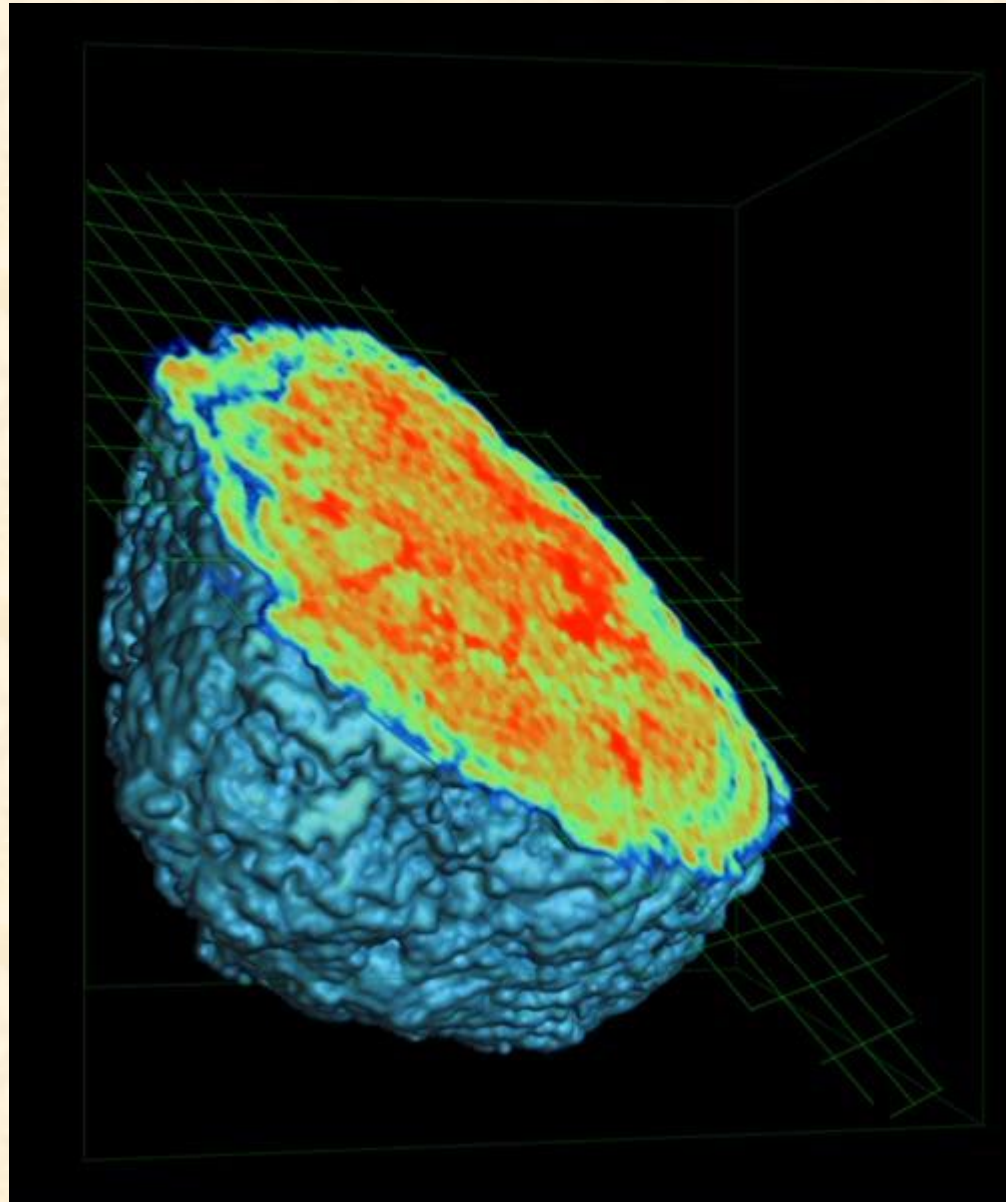
# Железо-марганцевая конкреция

1мм

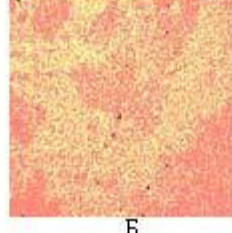
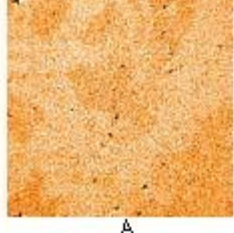
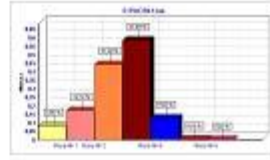
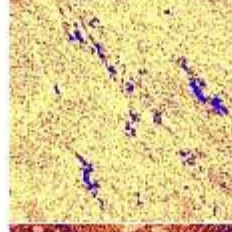
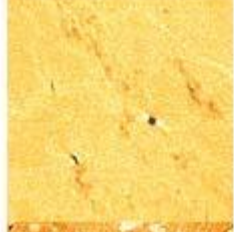
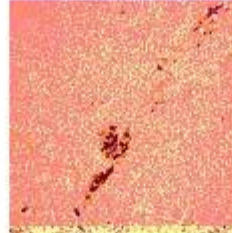
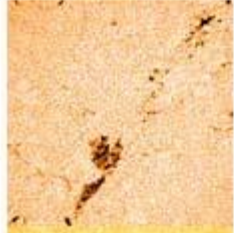
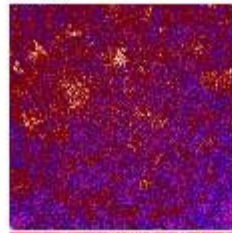


Трехмерное рентгеномтографическое изображение железо-марганцевой конкреции (1,0x1,6 мм): томограмма (А), разделение на фазы по программе TomAnalysis (Б) и гистограмма их процентного соотношения (В).

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.



10 мм



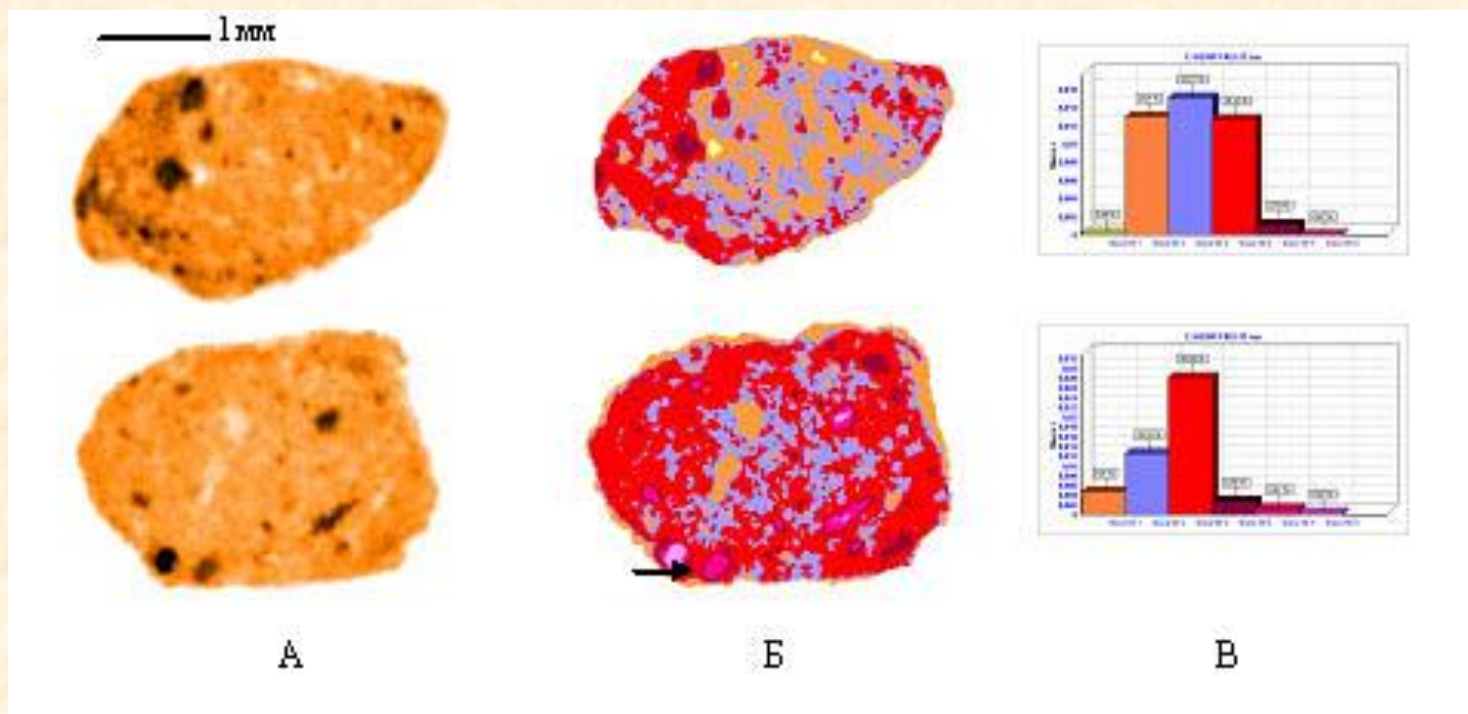
А

Б

В

По оперативно устанавливаемым данным рентгеномографического анализа о значениях и распределении ЛКО (диапазоне значений и средних величинах ЛКО) в исследуемом образце, можно прогнозировать содержание рудных минералов (в %), т.е. разбраковывать продуктивные (рудосодержащие) куски от пустой породы; устанавливать текстурно-структурные параметры и выявлять взаимосвязь этих параметров с технологическими свойствами (дробимость, измельчение, характер раскрытия рудных минералов и пр.), а также прогнозировать технологические показатели обогащения руд и потери в хвостах за счет неполного раскрытия минералов

## Прогноз свойств техногенного сырья на примере Fe-содержащих металлургических шлаков

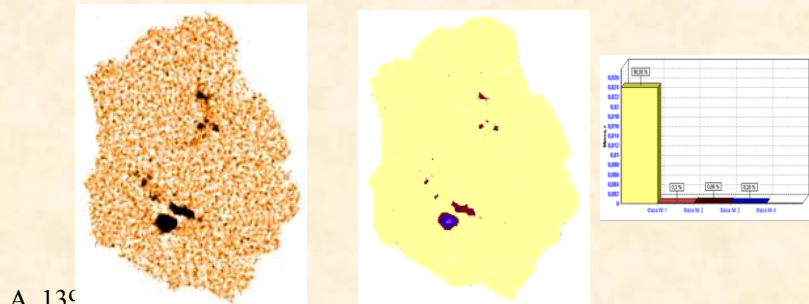
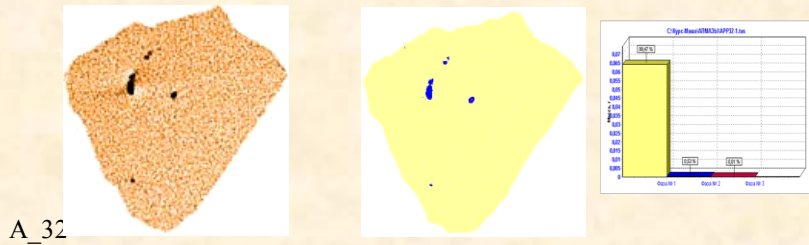


агрегаты магнетита: оливин – оранжевое, две фазы магнетита -голубое и красное, две фазы треворита -коричневое и малиновое, *Ni* в треворите – сиреневое.

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



# Исследование природных и синтетических алмазов



А

Б

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



1961



196-2



B<sup>198</sup>

А

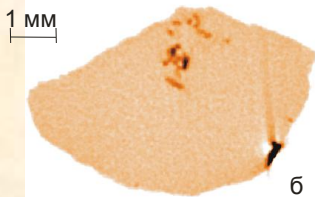
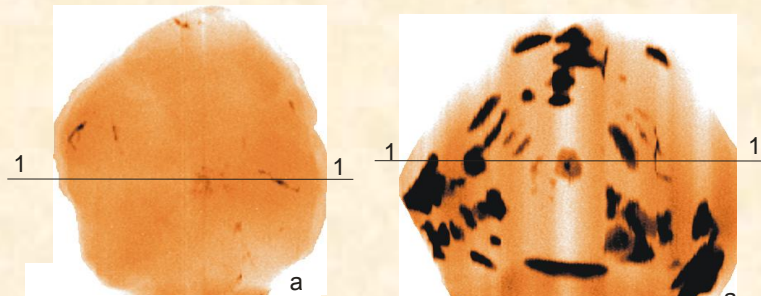
Б

В

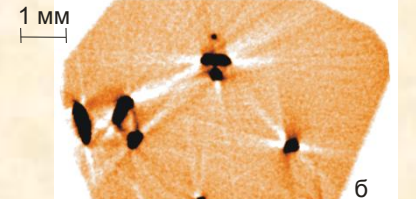
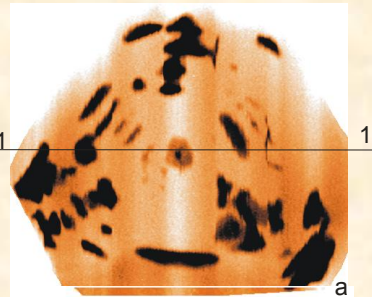
РТ синтетических алмазов, включение «кристалл в кристалле» указано стрелкой: алмазная матрица – желтое, оксиды – коричневое, карбиды металлов – коричневое, металлы (Fe) красное, Fe-Ni сплав – фиолетовое, Ni – малиновое.



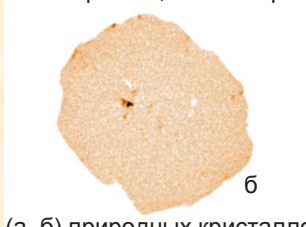
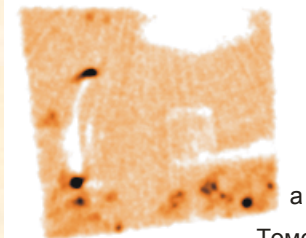
# Исследование алмазов (природных, синтетических) и алмазоносных пород, показана эффективность обнаружения алмазов в породе и диагностики включений



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

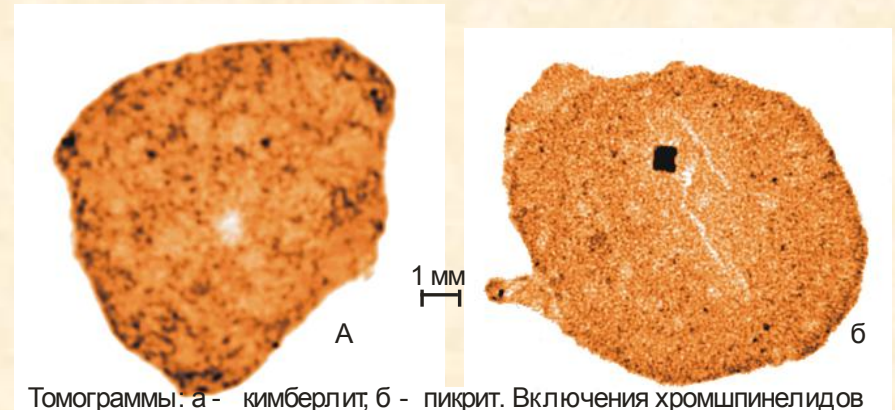


Синтетический монокристалл алмаза.  
а - рентгенограмма; б - томограмма.

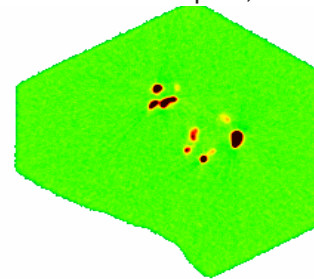


Томограммы (а, б) природных кристаллов алмаза: б- "кристалл в кристалле".

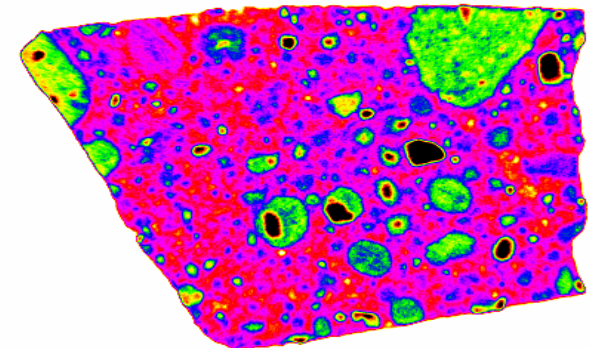
Исследования проведены совместно с геологическим ф-том МГУ им. М.В. Ломоносова



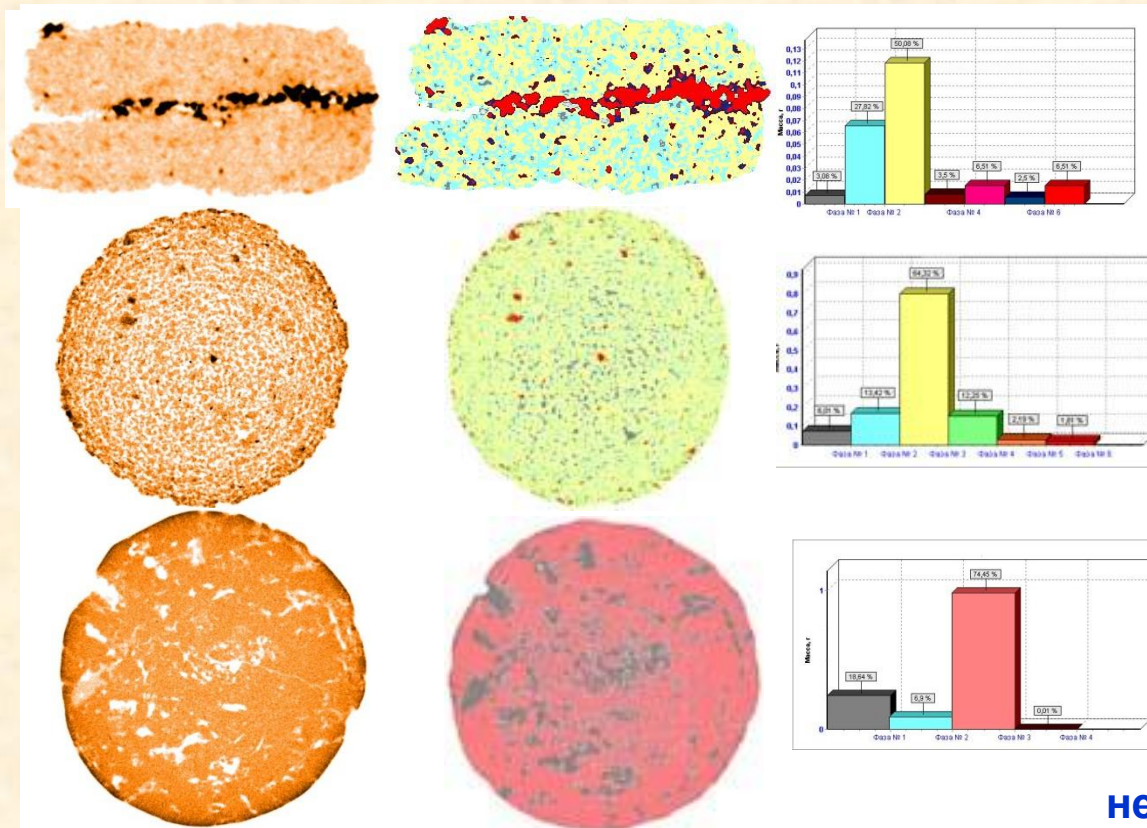
Томограммы: а - кимберлит, б - пикрит. Включения хромшпинелидов



*кимберлиты*



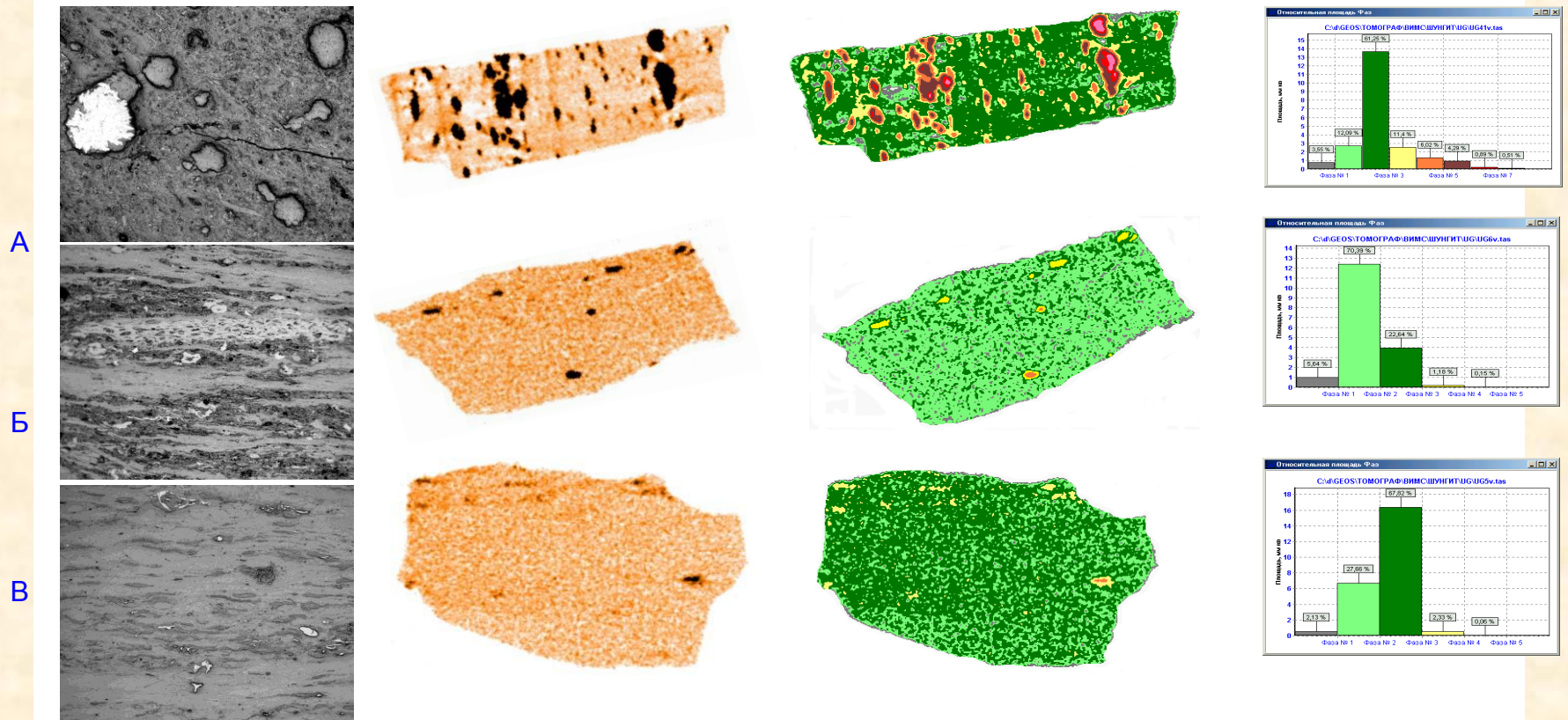
# Анализ пустотного пространства и вещественного состава пород – коллекторов для нефти и газа



Исследование керна нефтегазоносных пород

Порода	выделяемые фазы и их $\alpha_{\text{фр}}$ ( $\text{Al}_{\text{ср}}$ )								
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	оранжевое	синее	красное	
минералы	поры	слоистые алюмо- силикаты	кварц	полевые шпаты	карбонаты	гидроксиды	оксиды (Fe)	пирит	сульфиды

# Комплексирование РТ и оптической микроскопии на примере углей Хакасского месторождения



А - неоднородный дюрено-клареновый с высоким содержанием минеральных примесей;

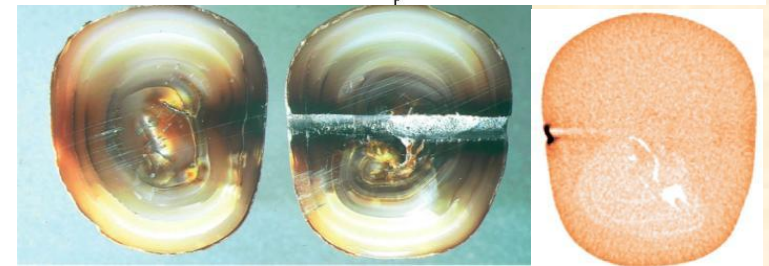
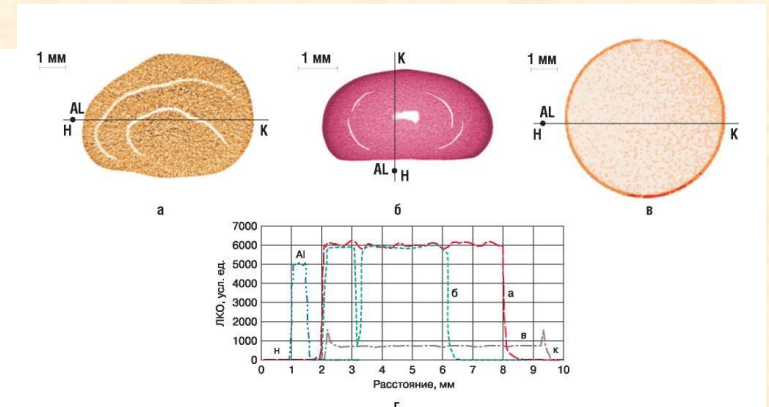
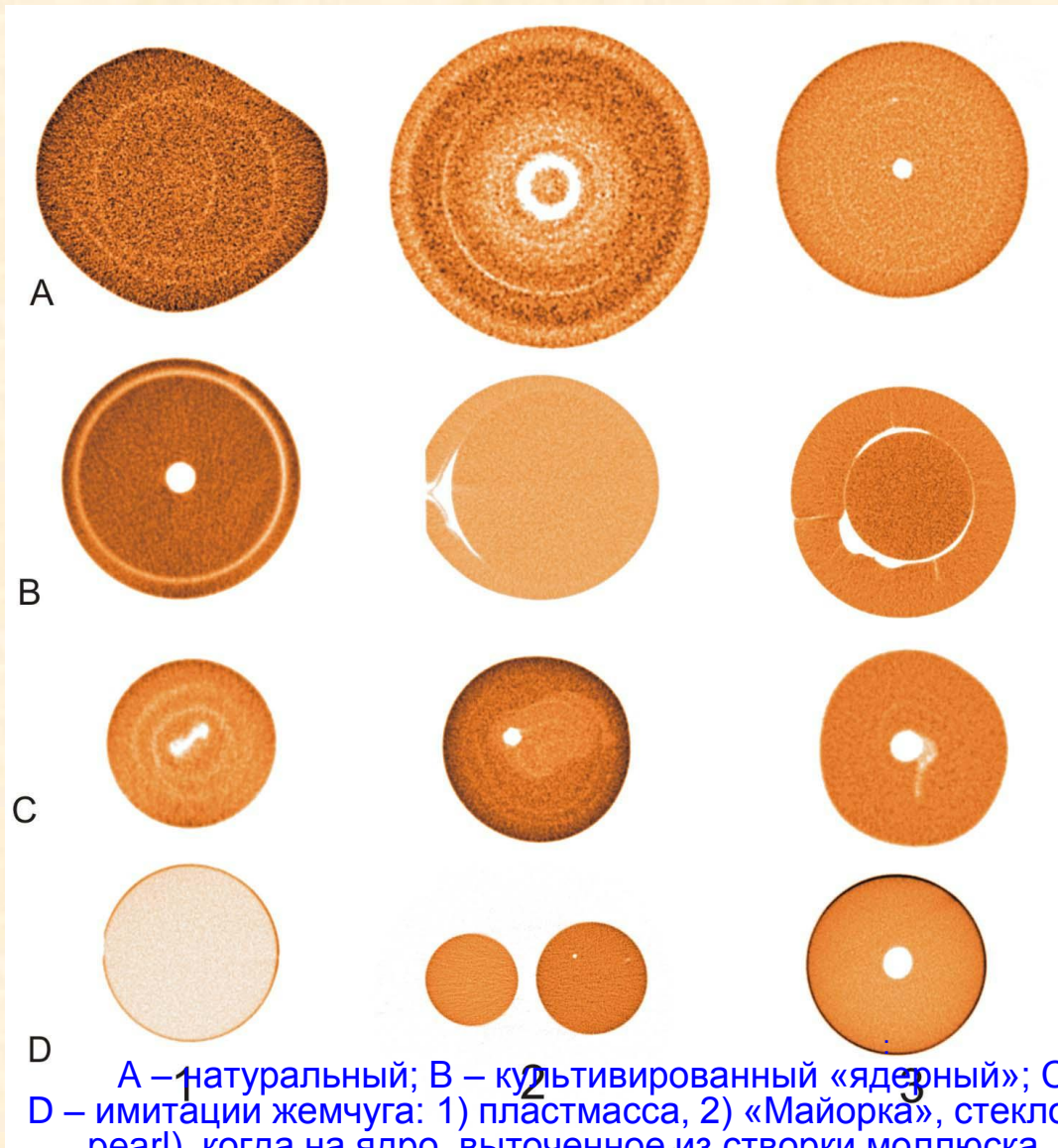
Б однородный дюреновый; В - однородный клареновый.

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

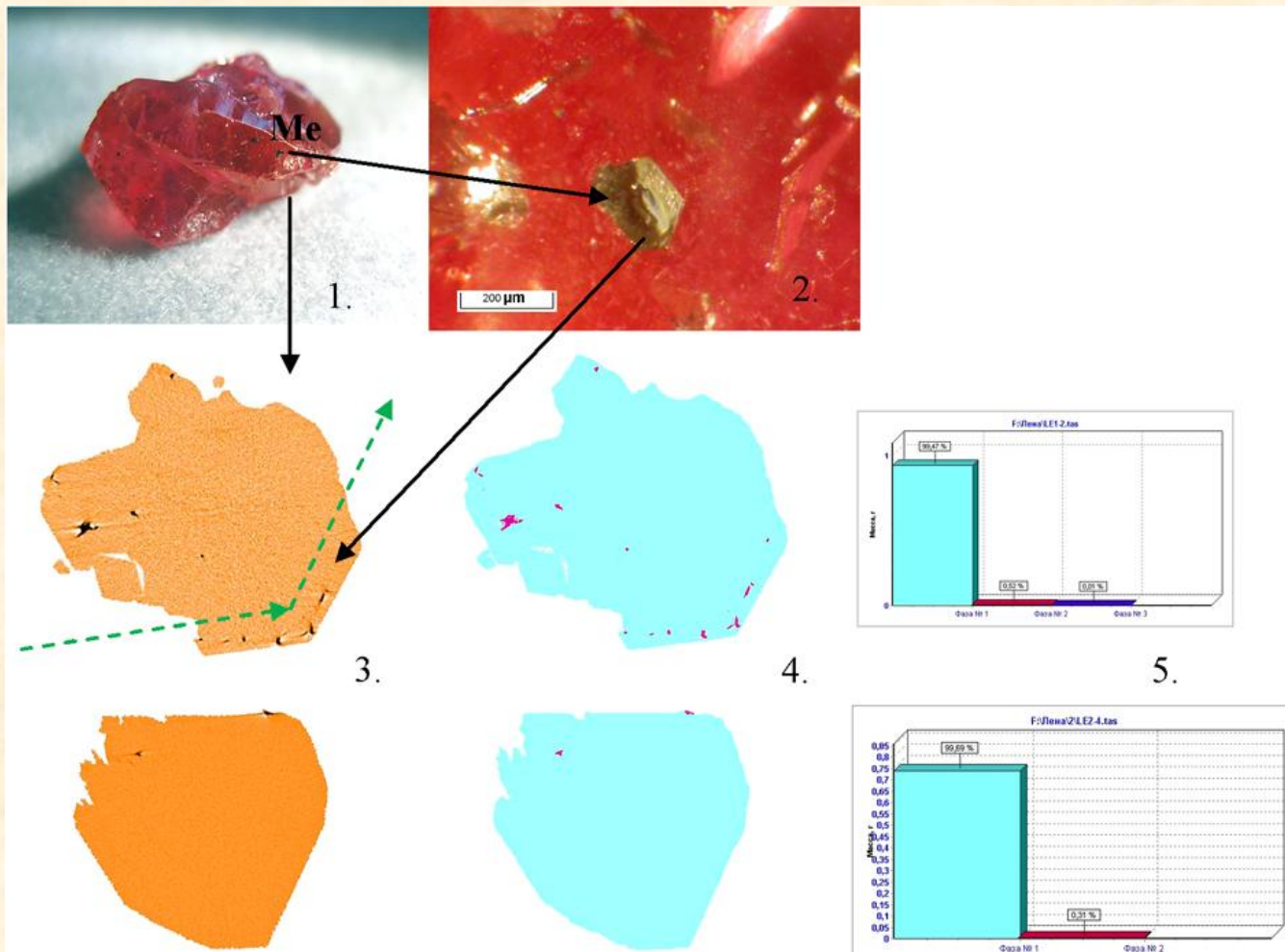
*Установлено*: 1-ая группа микролитотипов; средняя зольность однородных дюреновых и клареновых углей не превышает 2,35%, тогда как у неоднородного дюрено-кларенового угля составляет 25-27%.

Значимые минеральные примеси – пирит и сидерит.

# Томограммы жемчуга и его имитаций



А – 1 – натуральный; В – 2 – культивированный «ядерный»; С – 3 – культивированный «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); Е – Кешу-жемчуг, F – Мабэ, составной жемчуг,



- PT исследование кристалла флюсового рубина фирмы Chatham (образец 4):
- 1) общий вид (размер кристалла 1,5 x 1 x 0,5 см), включения металлических частиц (Me);
  - 2) макроизображение металлических частиц; 3) рентгеномикрофотография 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.

# 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



Разработанная методика РТ анализа внедрена в комплекс физических методов исследования, практически используется в ФГУП «ВИМС»



***Спасибо за внимание!***