

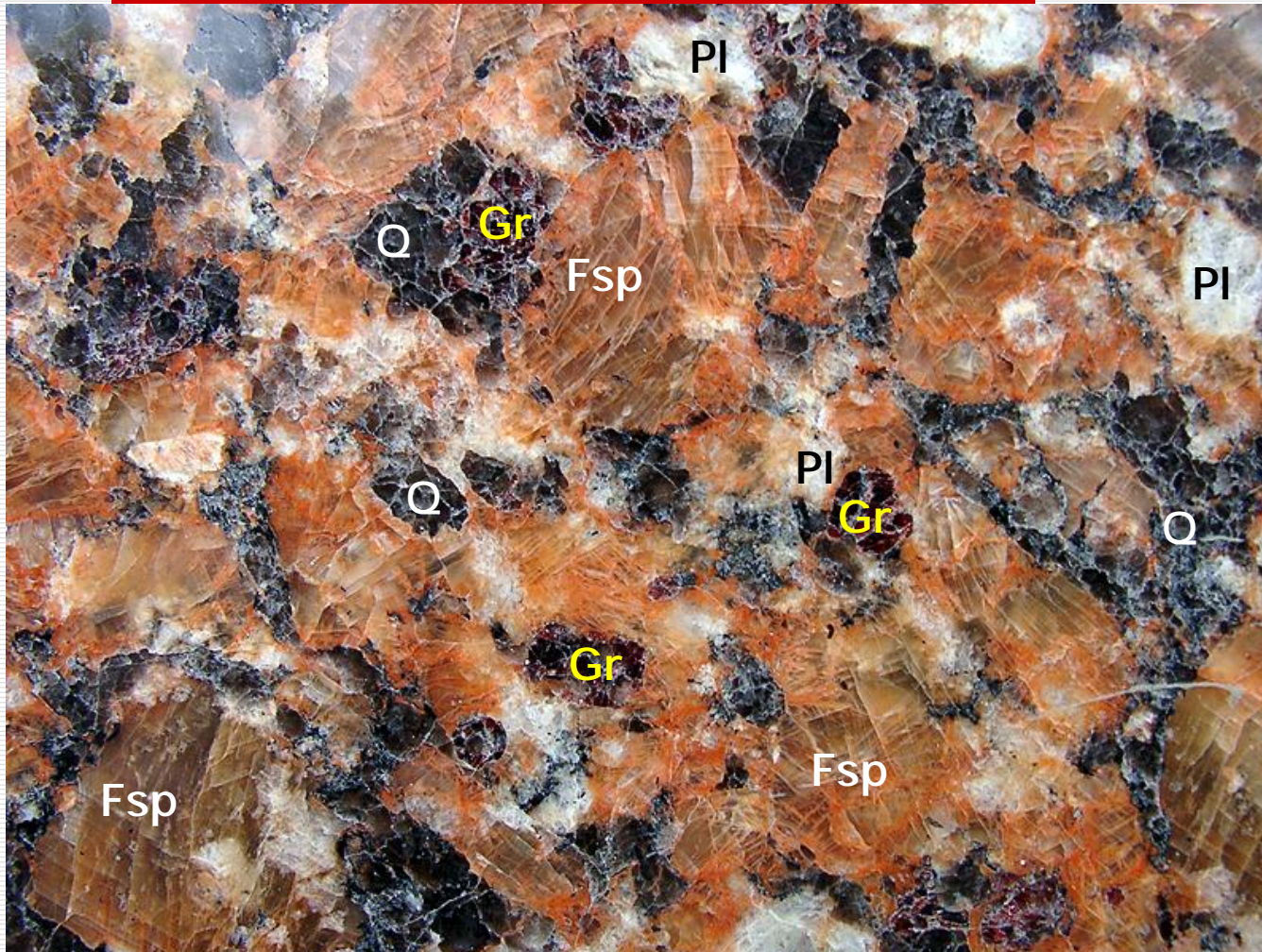
Методы петрографических исследований

Лекция 19 февраля 2010 г.
По курсу «Петрография с кристаллооптикой»

профессор, д.г.-м.н.
Павел Юрьевич Плечов

Объект петрографии – горные породы

Горные породы - природные ассоциации минералов более или менее постоянного химического состава, образующие самостоятельные геологические тела.



Минеральный состав?
Структура?
Текстура?
Название породы?
Происхождение?

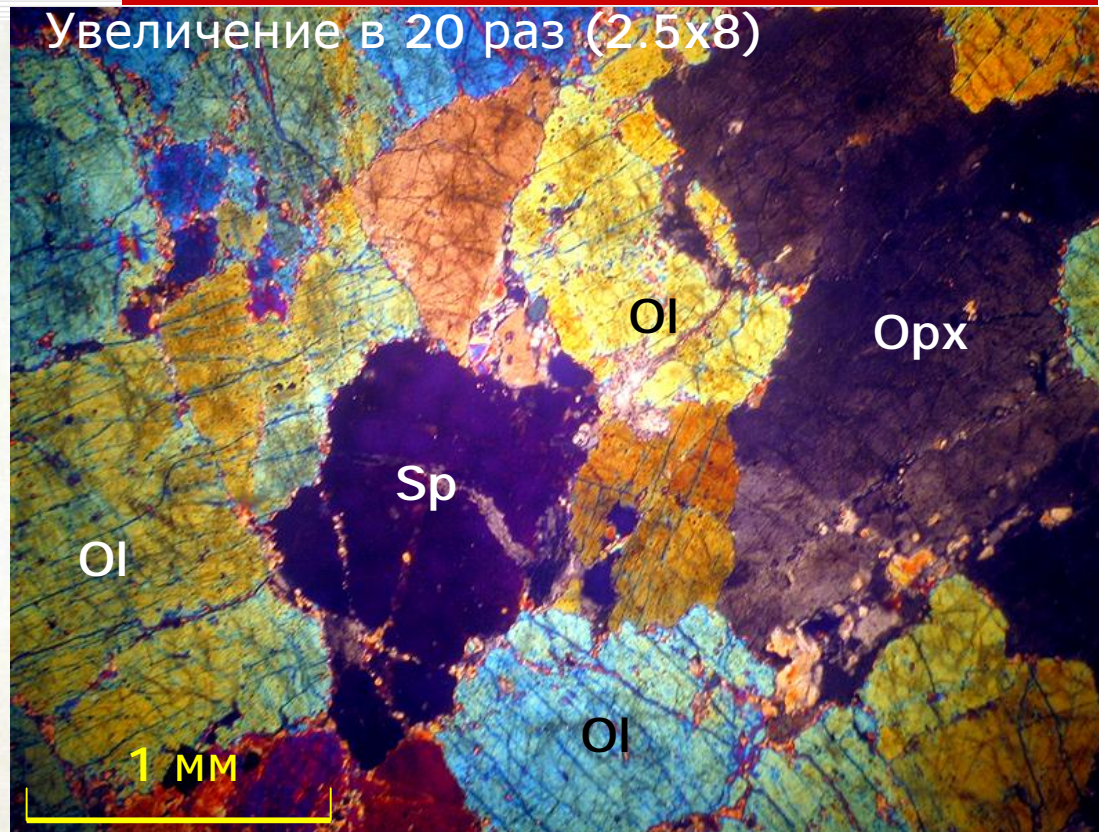
1 CM

Основные задачи петрографических исследований

- Диагностика породообразующих, второстепенных, акцессорных и вторичных минералов в горных породах.
 - Определение количественно-минералогического и химического состава горных пород.
 - Определение истории и условий формирования породы.
-

Диагностика породообразующих минералов

Породообразующими называются минералы, которых в породе более 5%



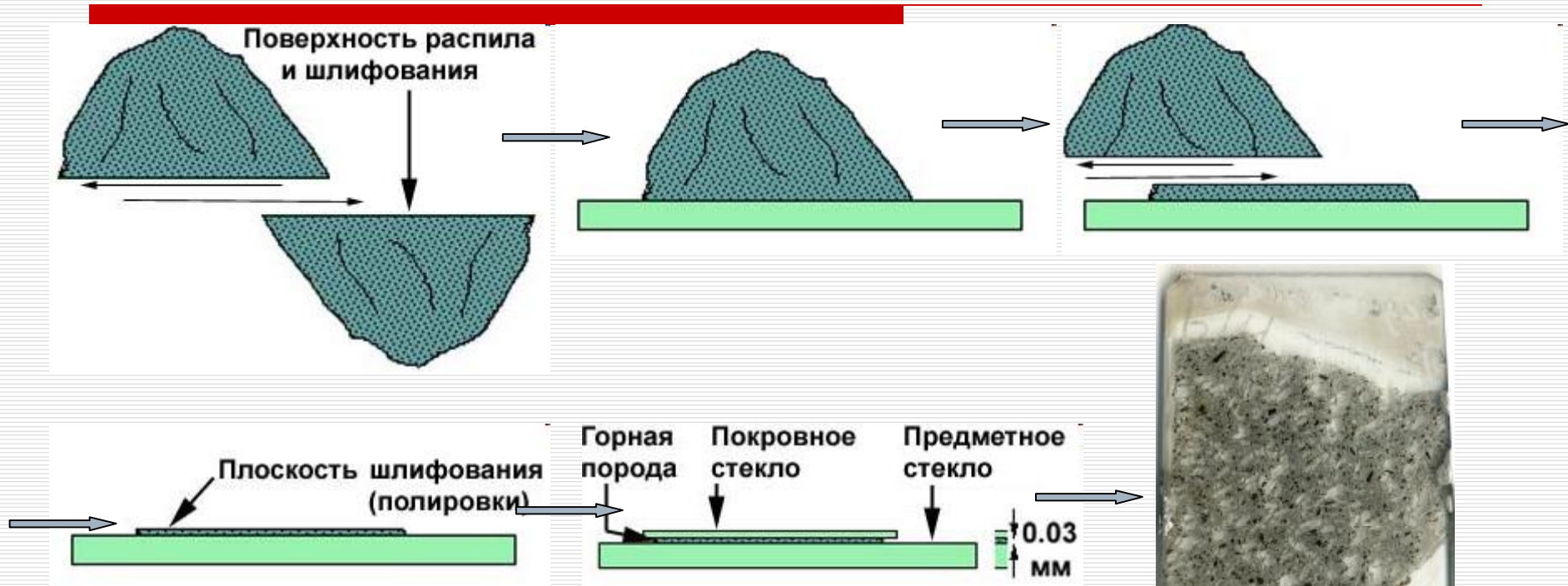
Ксенолит в породах вулкана Шивелуч

Обр. ПК-02/9в, июль 2002 г.



Изготовление шлифов

Шлиф [Thin section], (нем. Schliff, от schleifen — точить, шлифовать) петрографический, пластинка горной породы или минерала, предназначенная для микроскопических исследований в проходящем свете.



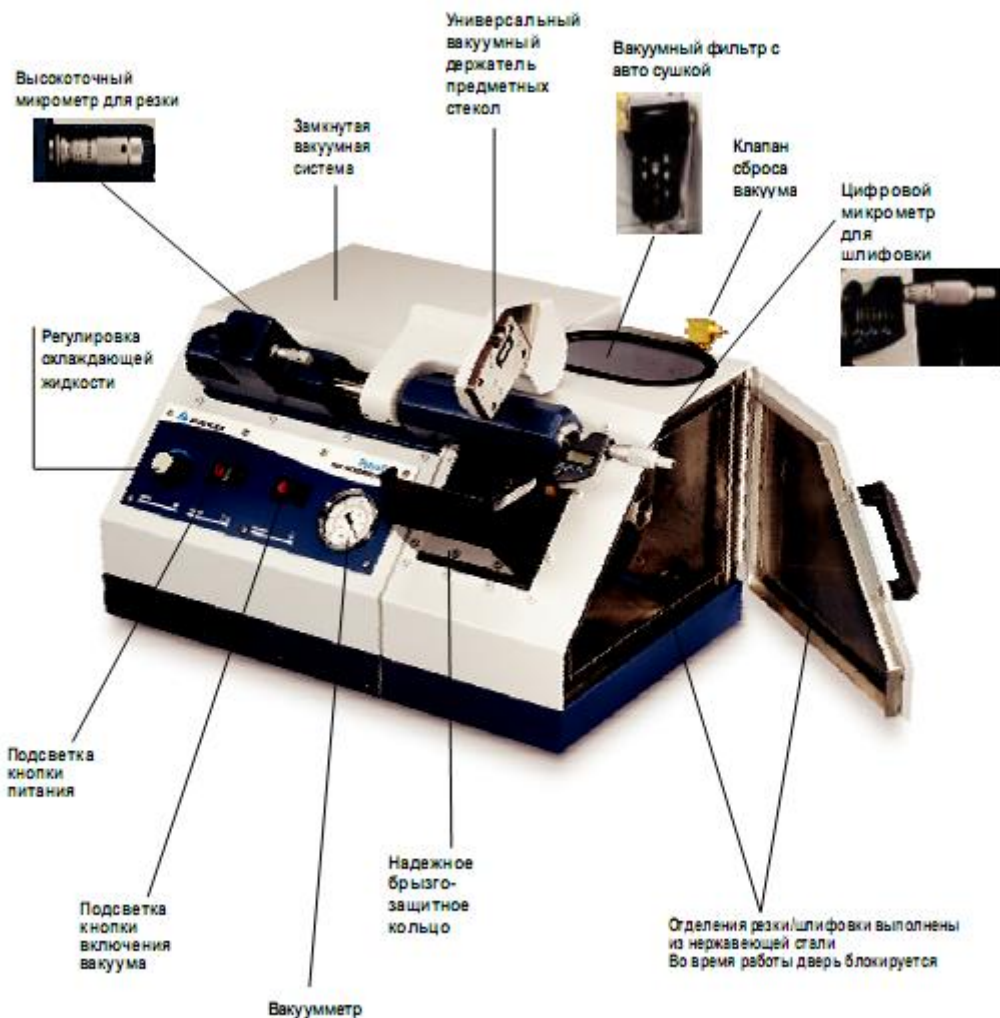
Основные типы шлифов:

1. С покровным стеклом на канадском бальзаме (обычные)
2. С полированной поверхностью на эпоксидной смоле (прозрачно-полированные)

Шлиф роговообманкового андезита, влк. Безымянный, 1956

рисунки Александра Милановского

Шлифовальная лаборатория геологического факультета МГУ



Станок Beta для шлифовки и полировки поверхностей

Шлифовальная лаборатория
делает 350 шлифов в месяц.

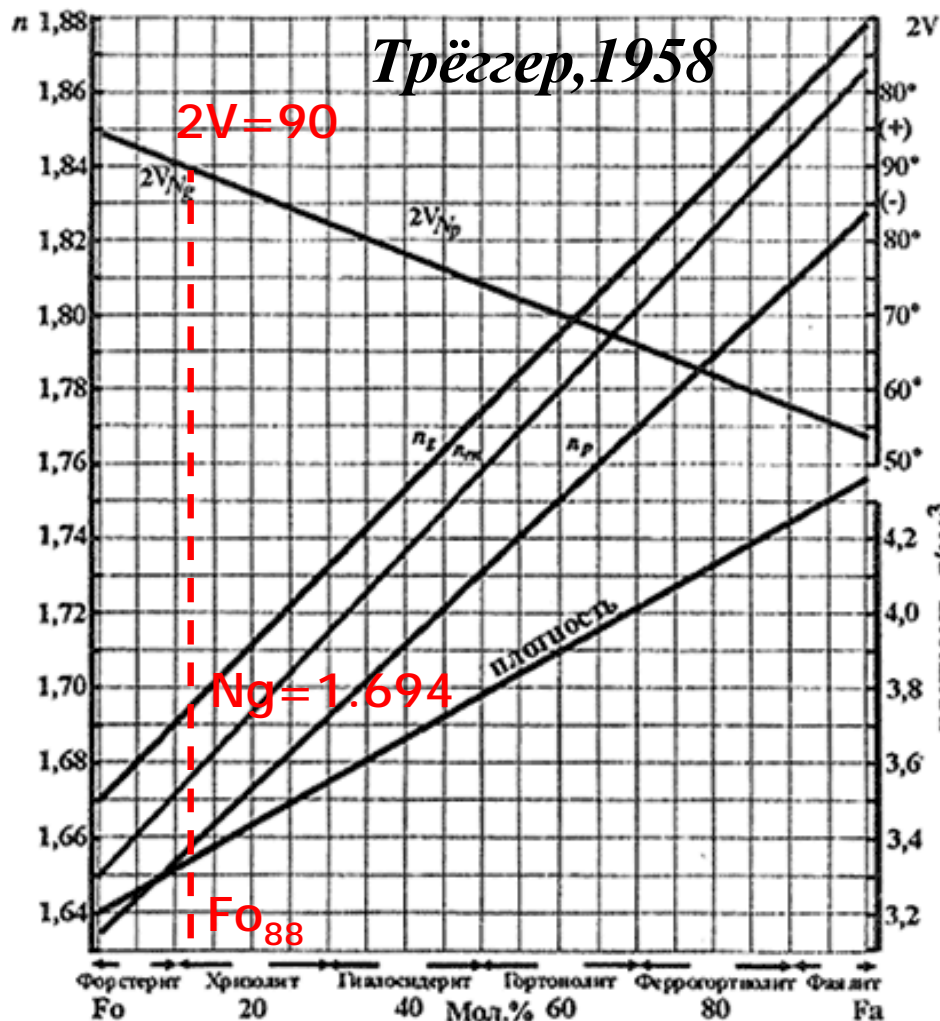
к. Ц-08, Ц-09, Ц-10

Тел. 939-21-09

Чураков Георгий Михайлович

Станок Petrothin для отреза и
сошлифовки до заданной толщины

Точные оптические константы и состав минералов



Ряд оливинов $(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$ – фаялит-форстерит

Для определения точных оптических констант, таких как углы погасания, $2V$, углы спайности, максимальная интерференционная окраска используется

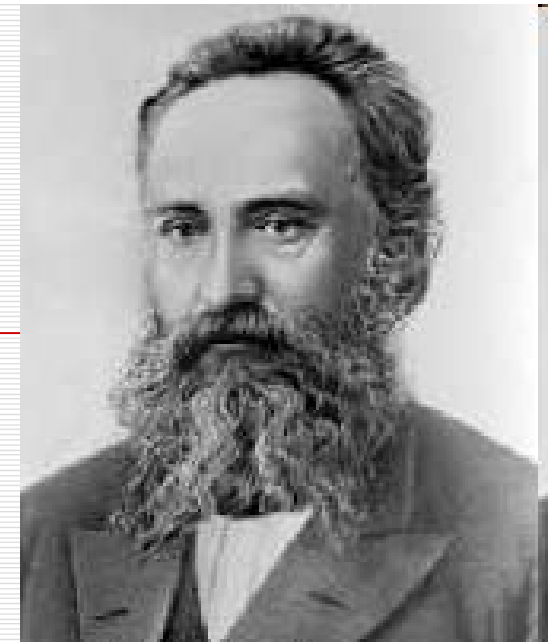
Федоровский столик

Для определения точных показателей преломления применяется

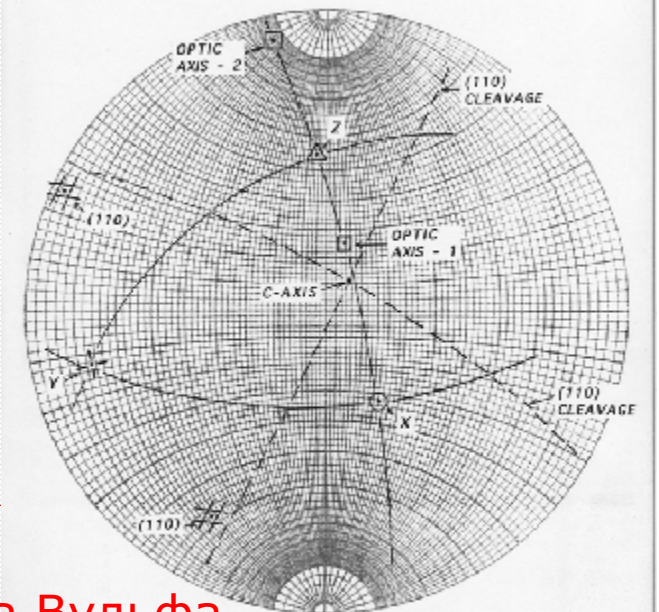
иммерсионный метод

Универсальный теодолитный метод Е.С.Федорова

Позволяет ориентировать исследуемое зерно минерала, определить направления кристаллографических и оптических осей



Евграф Степанович Федоров (1853-1919)



Фотография из Daniel E. Kile, 2009

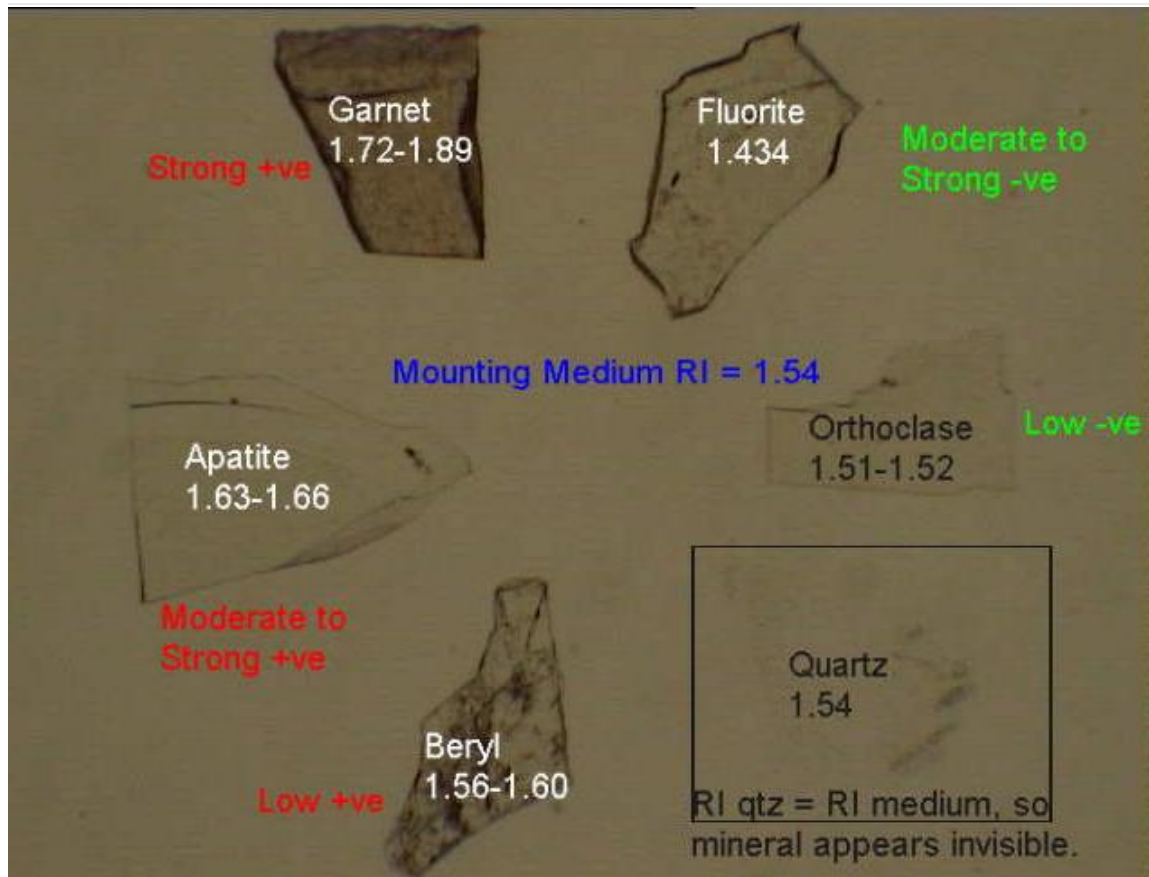
Сетка Вульфа

Простые рефрактометры для полированных образцов



Иммерсионный метод

(от лат. *immersio* - погружать) – метод определения показателей преломления, основанный на погружении зерен в различные жидкости и сравнении показателей преломления минерала и жидкости.



Фотография из курса оптической минералогии Greg Finn, Brock University, Canada (прямо около Ниагарского водопада)

Какое максимальное увеличение может быть у оптического микроскопа?

$$d = \lambda / NA$$

d – оптическое разрешение объектива, т.е. минимальное расстояние между двумя объектами, когда они не сливаются в один

λ (лямбда) – длина волны (для видимого света 380—760 нм)

NA (численная апертура) – характеристика объектива

$$NA = n \cdot \sin \theta$$

n – показатель преломления среды (в нашем случае воздух)

θ – максимальный угол, под которым попадает свет в объектив

Ответ: минимальное $d \approx 200$ нм (0.2 мкм)

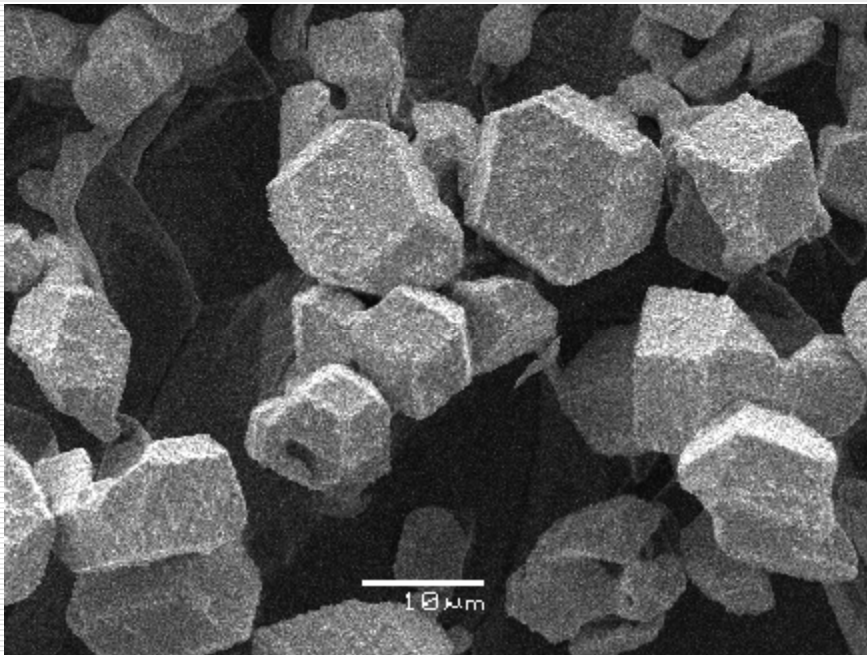
Максимальное увеличение $\sim 1200\times$



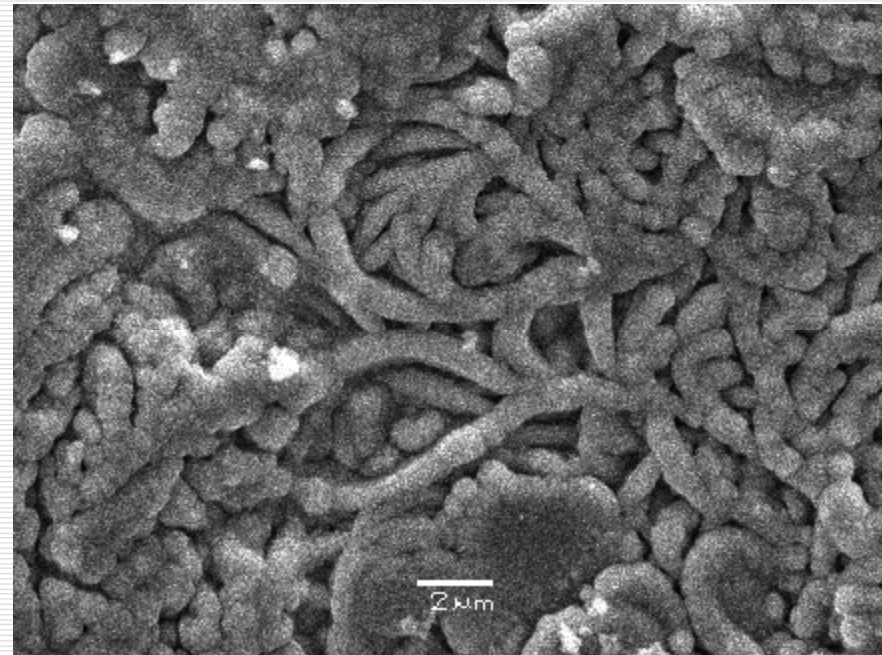
Эрнст Аббе (1840-1905)

Электронная микроскопия и микрозондовый анализ

Максимальное увеличение растрового электронного микроскопа – 500000х
Становятся различимы объекты ~1 нм



Кристаллы вольфрамата алюминия
на поверхности синтетического сапфира



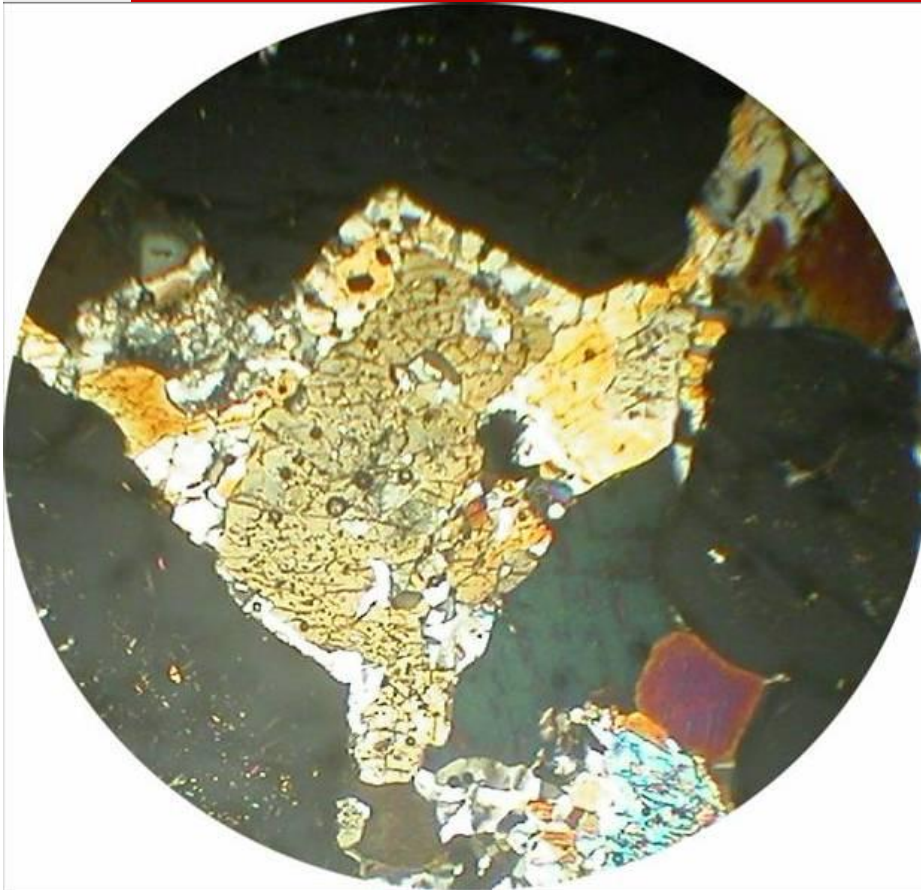
Выделения монооксида кремния
со стенок электропечи

Самое первое изображение получил Max Knoll (1935)

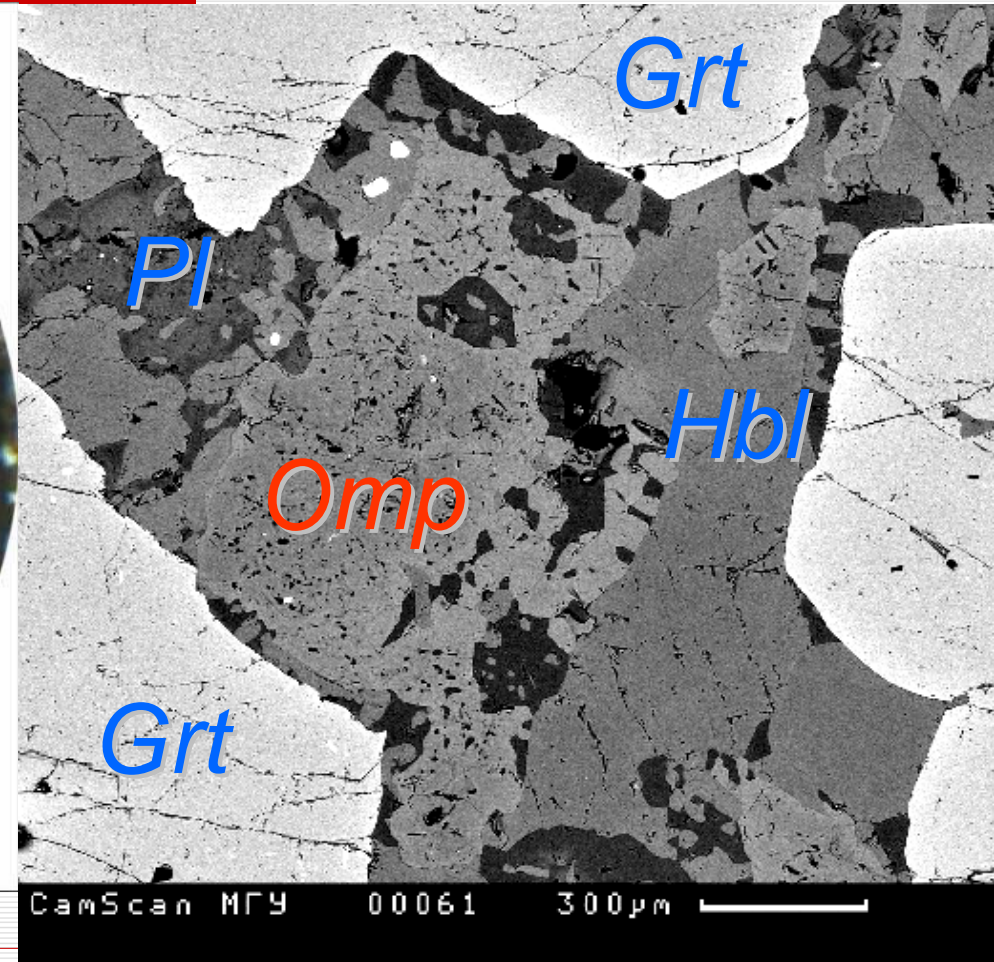
Первый промышленный электронный микроскоп "Stereoscan"
сконструирован Charles Oatley и Gary Stewart (1965) (Cambridge)

Растровая электронная микроскопия (SEM)

В отраженных электронах яркость примерно пропорциональна среднему атомному номеру минерала. По изменению яркости можно судить о зональности минерала



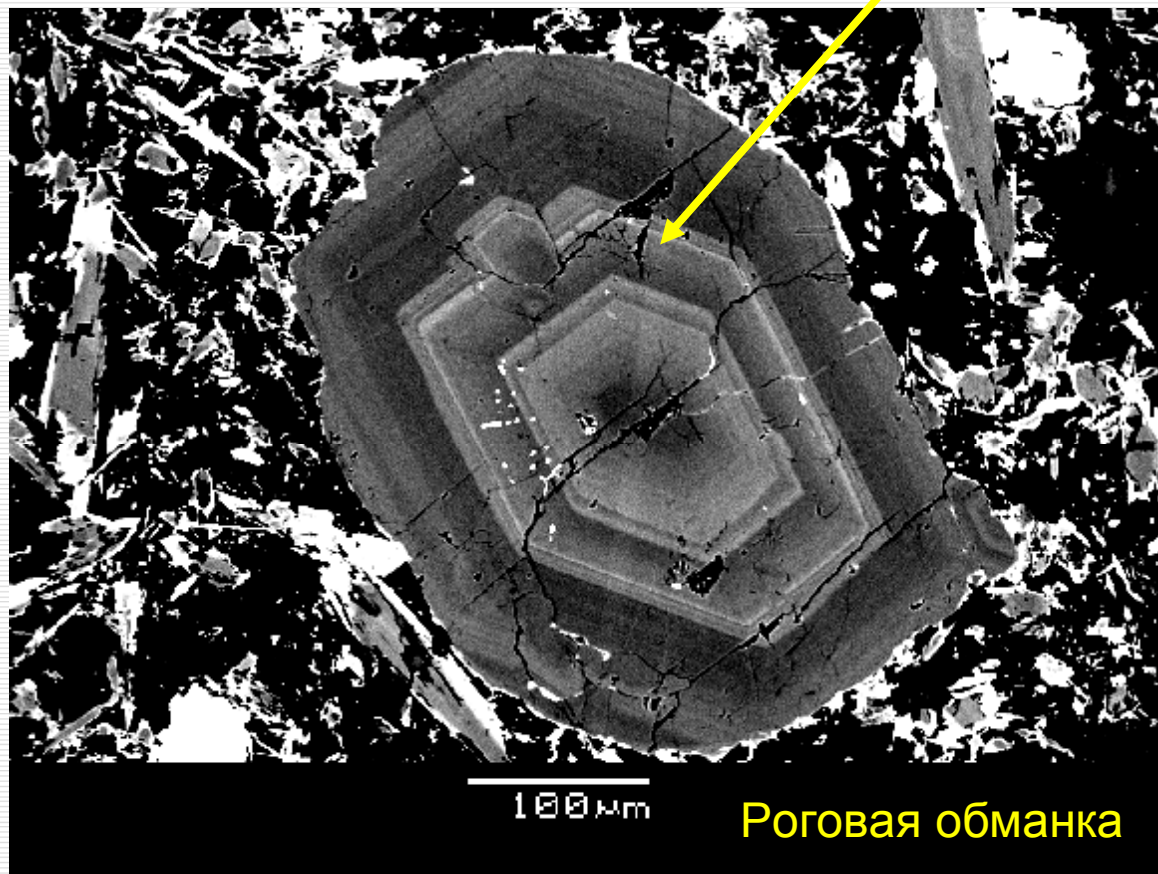
Поляризационный микроскоп,
скрещенные николи



Электронный микроскоп,
отраженные электроны

Изучение зональности минералов

Двойниковая пластина



Электронный микроскоп JEOL JSM-6480LV

лаборатория методов локального вещества кафедры петрологии
МГУ, комн. 505, тел. 939-57-14

электронная пушка

колонна
микроскопа

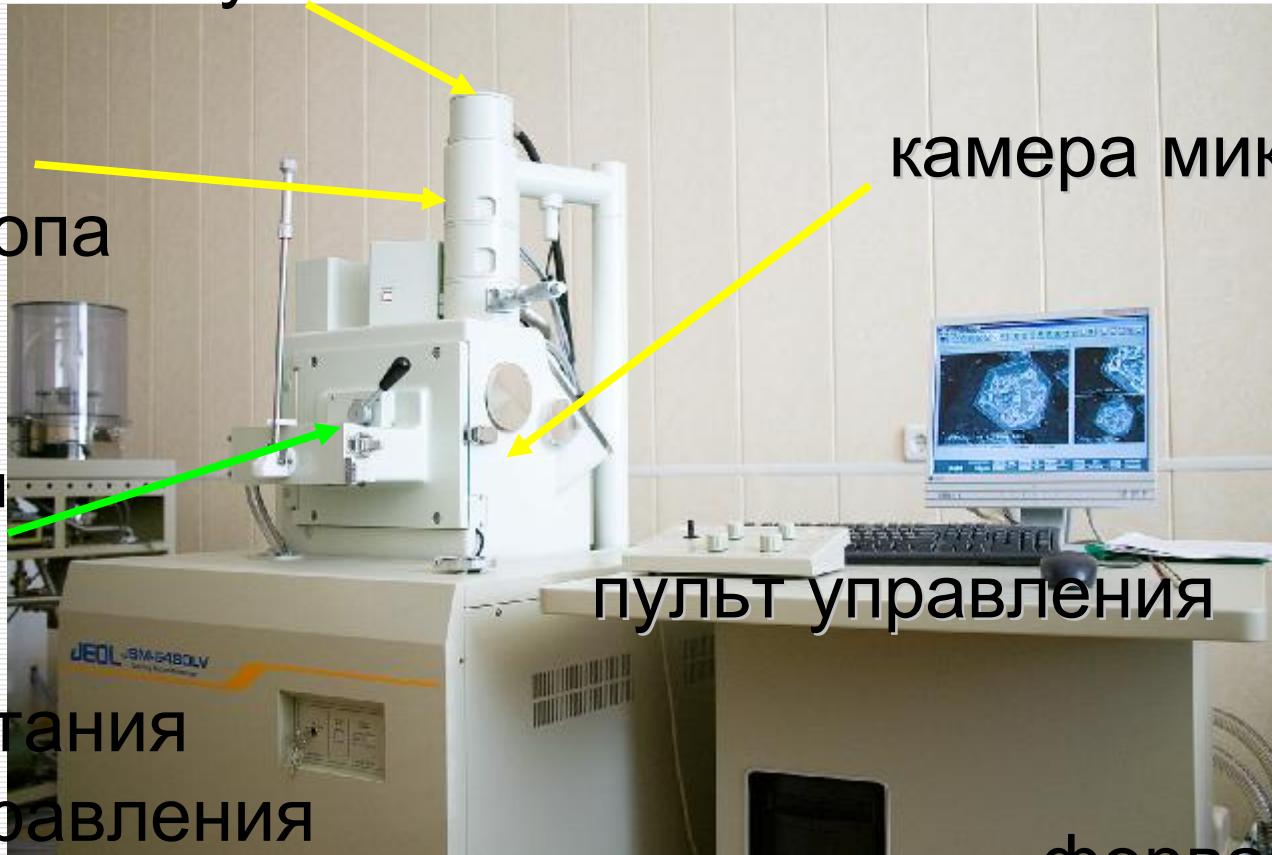
камера микроскопа

вакуумный
шлюз

пульт управления

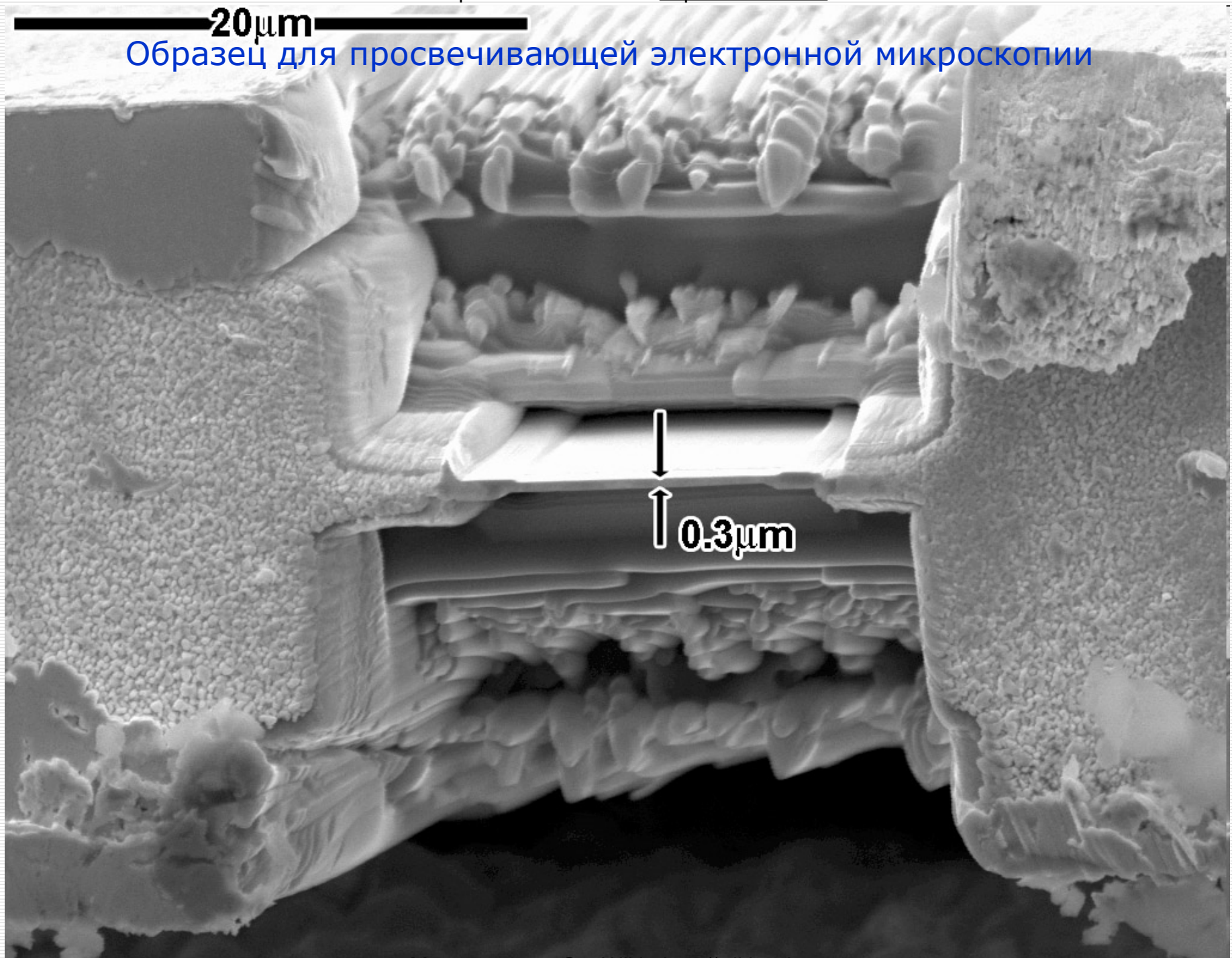
блок питания
блок управления
вакуумная система

форвакуумные
насосы



20 μm

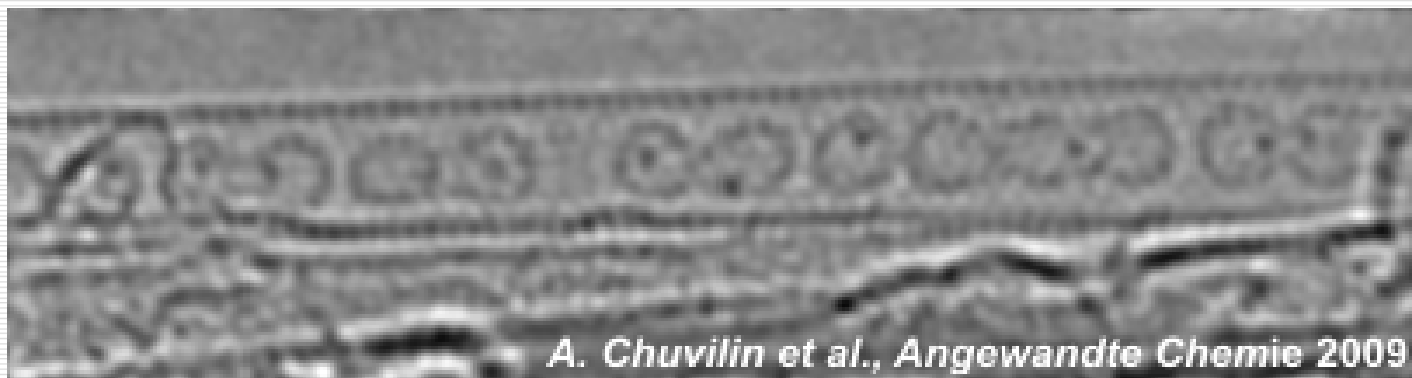
Образец для просвечивающей электронной микроскопии



Просвечивающая электронная микроскопия (ТЕМ)

Максимальное разрешение приборов 0.8 \AA (0.08 нм)
диаметр атома водорода $\sim 1.6 \text{ \AA}$

- наблюдения молекулярных структур;
- изучение дефектов кристаллических структур (вакансии, дислокации, субзерновые границы и т.д.);



тепловое движение атомов диспрозия (темные точки)
внутри углеродной нанотрубки (ускорено примерно в 60 раз)



Химический анализ

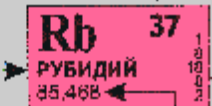
ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

www.calc.ru



Д.И. Менделеев
1834–1907

СИМВОЛ ЭЛЕМЕНТА ПОРЯДКОВОЙ НОМЕР



Rb 37

НАЗВАНИЕ ЭЛЕМЕНТА

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ АТОМНАЯ МАССА

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПО СЛОЯМ

-  s-элементы
-  p-элементы
-  d-элементы
-  f-элементы

Периоды	Ряды	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ																Заряд ядра Упр. В.	
		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII			
		а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б		
1	1	H ВОДОРОД 1,007																He ГЕЛИЙ 4,003	2
2	2	Li ЛИТИЙ 6,941	Be БЕРИЛЛИЙ 9,0122	B БОР 10,81	C УГЛЕРОД 12,011	N АЗОТ 14,007	O КИСЛОРОД 15,999	F ФТОР 18,998										Ne НЕОН 20,179	10
3	3	Na НАТРИЙ 22,99	Mg МАГНИЙ 24,312	Al АЛЮМИНИЙ 26,981	Si КРЕМНИЙ 28,086	P ФОСФОР 30,974	S СЕРА 32,064	Cl ХЛОР 35,453										Ar АРГОН 39,948	18
4	4	K КАЛИЙ 39,102	Ca КАЛЬЦИЙ 40,08	Sc СКАНДИЙ 44,956	Ti ТИТАН 47,88	V ВАНАДИЙ 50,942	Cr ХРОМ 51,996	Mn МАРГАНЦ 54,938	Fe ЖЕЛЕЗО 55,847	Co КОБАЛЬТ 58,933	Ni НИКЕЛЬ 58,69								
	5	Cu МЕДЬ 63,546	Zn ЦИНК 65,37	Ga ГАЛЛИЙ 69,723	Ge ГЕРМАНИЙ 72,63	As АРСЕН 74,922	Se СЕРЕН 78,96	Br БРОМ 79,904											Kr КРИПТОН 83,8
5	6	Rb РУБИДИЙ 85,468	Sr СТРОНЦИЙ 87,62	Y ИТРИЙ 88,906	Zr ЦИРКОНИЙ 91,224	Nb НИОБИЙ 92,906	Mo МОЛИБДЕН 95,94	Tc ТЕХНЕЦИЙ [98]	Ru РУТЕНИЙ 101,07	Rh РОДИЙ 102,906	Pd ПАЛЛАДИЙ 106,42								
	7	Ag СЕРЕБРО 107,868	Cd КАДМИЙ 112,411	In ИНДИЙ 114,818	Sn ОЦЕНОК 118,71	Sb СУРЬМА 121,757	Te ТЕЛЛУР 127,6	I ИОД 126,905											Xe КСЕНОН 131,3
6	8	Cs ЦЕЗИЙ 132,905	Ba БАРИЙ 137,327	La ЛАНТАНОИДЫ [57-71]	Hf ГАФНИЙ 178,49	Ta ТАНТАЛ 180,948	W ВОЛЬФРАМ 183,85	Re РЕНИЙ 186,207	Os ОСМИЙ 190,23	Ir ИРИДИЙ 192,22	Pt ПЛАТИНА 195,08								
	9	Au ЗОЛОТО 196,967	Hg РУТУТЬ 200,59	Tl ТАЛЛИЙ 204,38	Pb СВИНЕЦ 207,19	Bi ВИСМУТ 208,98	Po ПОЛОНИЙ [209]	At АСТАТ [210]											Rn РАДОН [222]
7	10	Fr ФРАНЦИЙ [223]	Ra РАДИЙ [226]	Ac АКТИНОИДЫ [89-103]	Rf РЕЗЕРФОРДИЙ [261]	Db ДУБИНИЙ [262]	Sg СИБОРГИЙ [263]	Bh БОРИЙ [264]	Hn ХАННИЙ [265]	Mt МЕЙТЕНЕРИЙ [266]									

ЛАНТАНОИДЫ

57 La ЛАНТАН 138,905	58 Ce ЦЕРИЙ 140,12	59 Pr ПРАЗЕОДИЙ 140,908	60 Nd НЕОДИМ 144,24	61 Pm ПРОМЕТИЙ [145]	62 Sm САМАРИЙ 150,36	63 Eu ЕВРОПИЙ 151,96	64 Gd ГАДОЛИНИЙ 157,25	65 Tb ТЕРБИЙ 158,925	66 Dy ДИСПРОЗИЙ 162,5	67 Ho ГОЛЬМИЙ 164,93	68 Er ЭРБИЙ 167,26	69 Tm ТУЛЬИЙ 168,934	70 Yb ИТТЕРБИЙ 173,04	71 Lu ЛЮТЕЦИЙ 174,967
-----------------------------------	---------------------------------	--------------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	------------------------------------

АКТИНОИДЫ

89 Ac АКТИНИЙ [227]	90 Th ТОРИЙ 232,038	91 Pa ПРОТАКТИНИЙ [231]	92 U УРАН 238,029	93 Np НЕПТУНИЙ [237]	94 Pu ПЛУТОНИЙ [244]	95 Am АМЕРИЦИЙ [243]	96 Cm КУРЧИЙ [247]	97 Bk БЕРКЛИЙ [247]	98 Cf КАЛИФОРНИЙ [251]	99 Es ЭЙЗЕНСТАДТ [252]	100 Fm ФЕРМИЙ [257]	101 Md МЕНДЕЛЕВИЙ [258]	102 No НОБЕЛИЙ [259]	103 Lr ЛЮРЕНСИЙ [260]
----------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------

Рентген-флюоресцентный метод

Химическая лаборатория геологического факультета находится в
комн.Ц-11(левый ус), тел. 939-2961



www.mtm.kuleuven.be/.../Chemical/WDXRF.html

Рентген-флюоресцентный анализатор
Philips 2400



www.ru.ac.za/geology/geology/analyticalfacilities

Препараты для рентгено-
флюоресцентного анализа

Многоколлекторный масс-спектрометр индуктивно-связанной плазмы

Используется для анализа содержаний $> 10^{-12}$ - 10^{-2} масс.% и для измерения отношений изотопов



Препаратами являются растворы горных пород.

www.esf-carbonate.org/project_details.aspx

Локальный микроанализ

Микрозонд обычно совмещен с электронным микроскопом. Возможен анализ объектов $>1 \mu\text{m}$, порог обнаружения элементов $\sim 0.02\%$ масс.



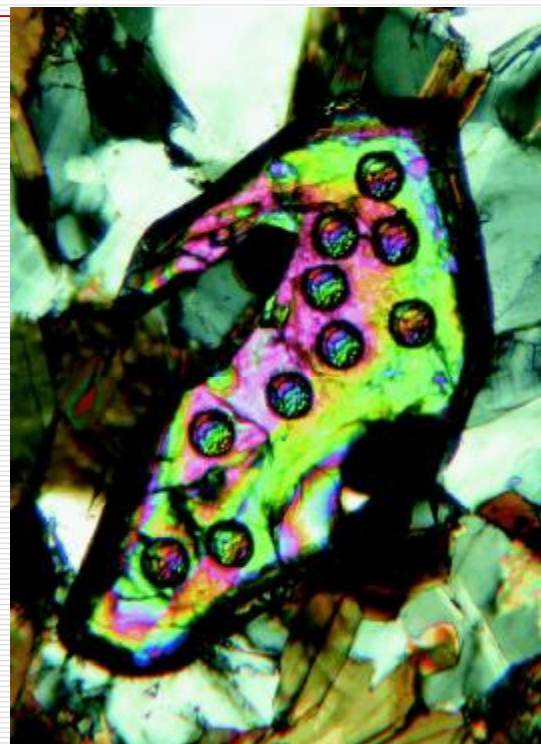
Микрозонд Cameca SX-100

Масс-спектрометрия индуктивно связанной плазмы с лазерным испарением



create.gl.ntu.edu.tw/Facilities.htm

Wave UP213 laser ablation system + Agilent 7500s ICP-MS



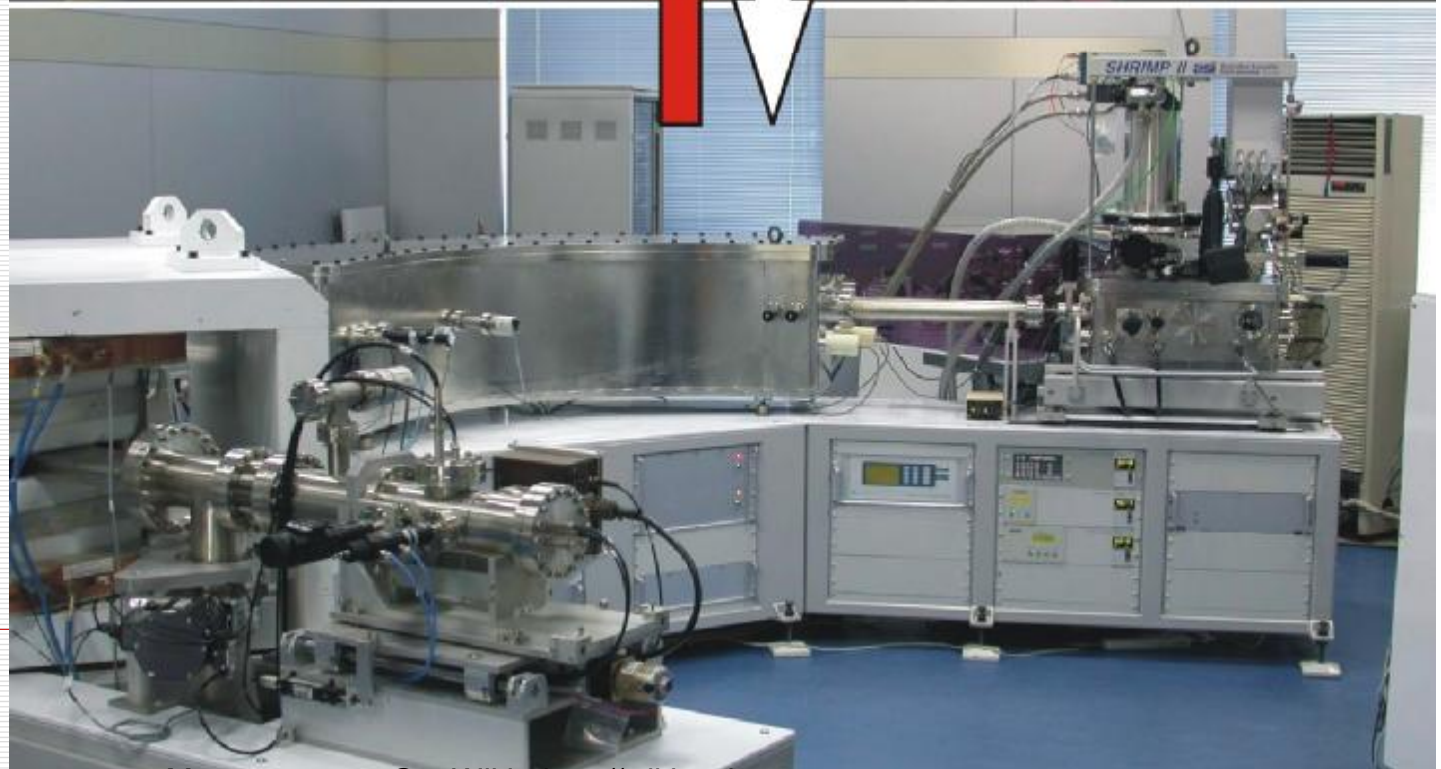
ees.acadiau.ca/content/mac-sc/macsc40/sc40.html

Следы анализа с использованием лазерного испарения

SHRIMP

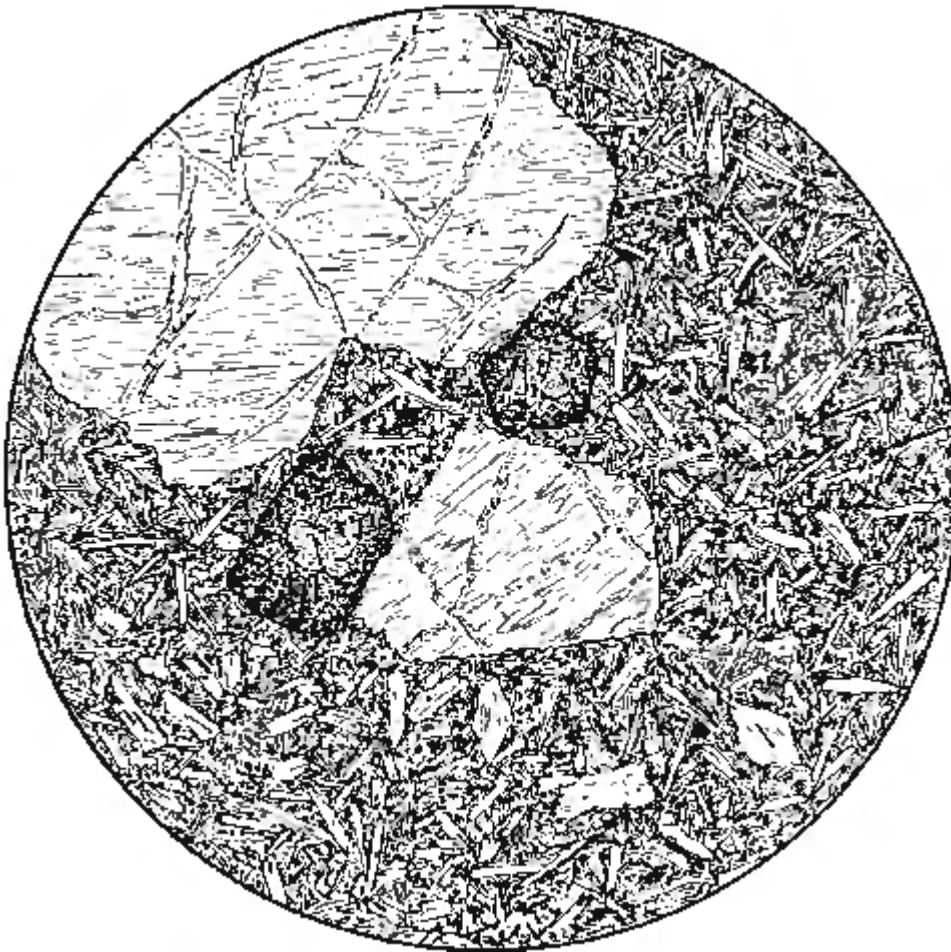
Высокоточный
ионный
микронзонд

Позволяет точно
измерять
отношения
изотопов в точке
~20 μm , что дает
возможность
определить
абсолютный
возраст
минерала по
отдельным зонам



Количественная оценка минерального состава

1. **Визуальная оценка**
2. Инструментальная оценка
3. Расчет из хим. состава породы
4. Автоматизированные методы

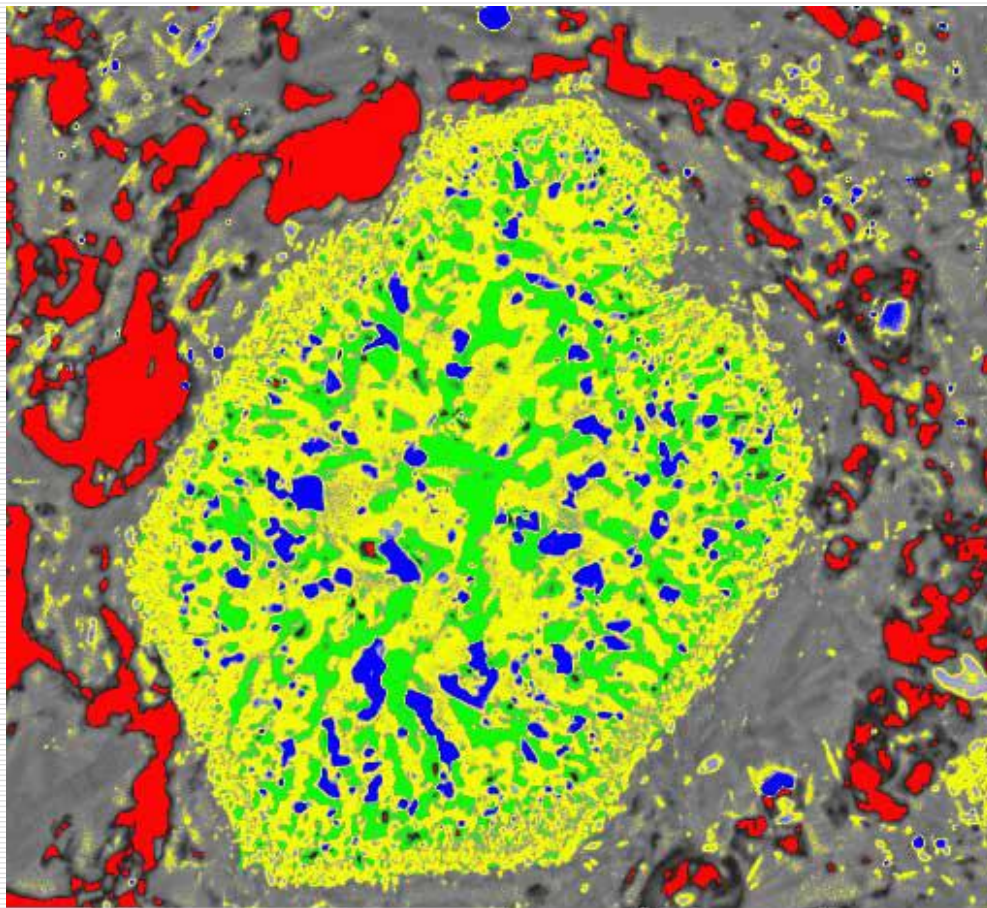


1. Примерная глазомерная оценка
2. Метод палеток
3. Пуш-интераторы
4. Анализ фотографий

Количественная оценка минерального состава

Применяя компьютерные методы обработки изображений в отраженных электронах, можно получить количественную оценку минерального состава

1. Визуальная оценка
- 2. Инструментальная оценка**
3. Расчет из хим. состава породы
4. Автоматизированные методы



Красное – пузырьки
Желтое – плагиоклаз
Синее – магнетит
Зеленое – клино- и ортопироксены

Реакция разложения роговой обманки, влк.Безымянный, Камчатка

Количественная оценка минерального состава

Для оценки количества рудных и аксессуарных минералов используют тяжелые или магнитные фракции

1. Визуальная оценка
- 2. Инструментальная оценка**
3. Расчет из хим. состава породы
4. Автоматизированные методы



Электромагнитный сепаратор



Разделение в тяжелых жидкостях

Породы дробятся и разделяются на фракции по магнитности и удельному весу. Каждая фракция анализируется отдельно.

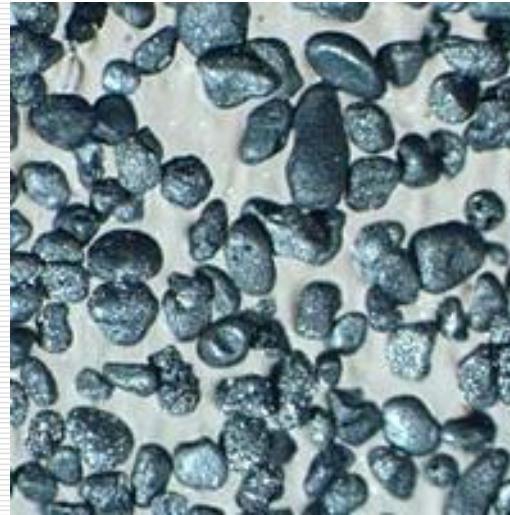
Количественная оценка минерального состава

Для оценки количества рудных и аксессуарных минералов используют тяжелые или магнитные фракции

1. Визуальная оценка
2. **Инструментальная оценка**
3. Расчет из хим. состава породы
4. Автоматизированные методы



Циркон



Ильменит



Апатит



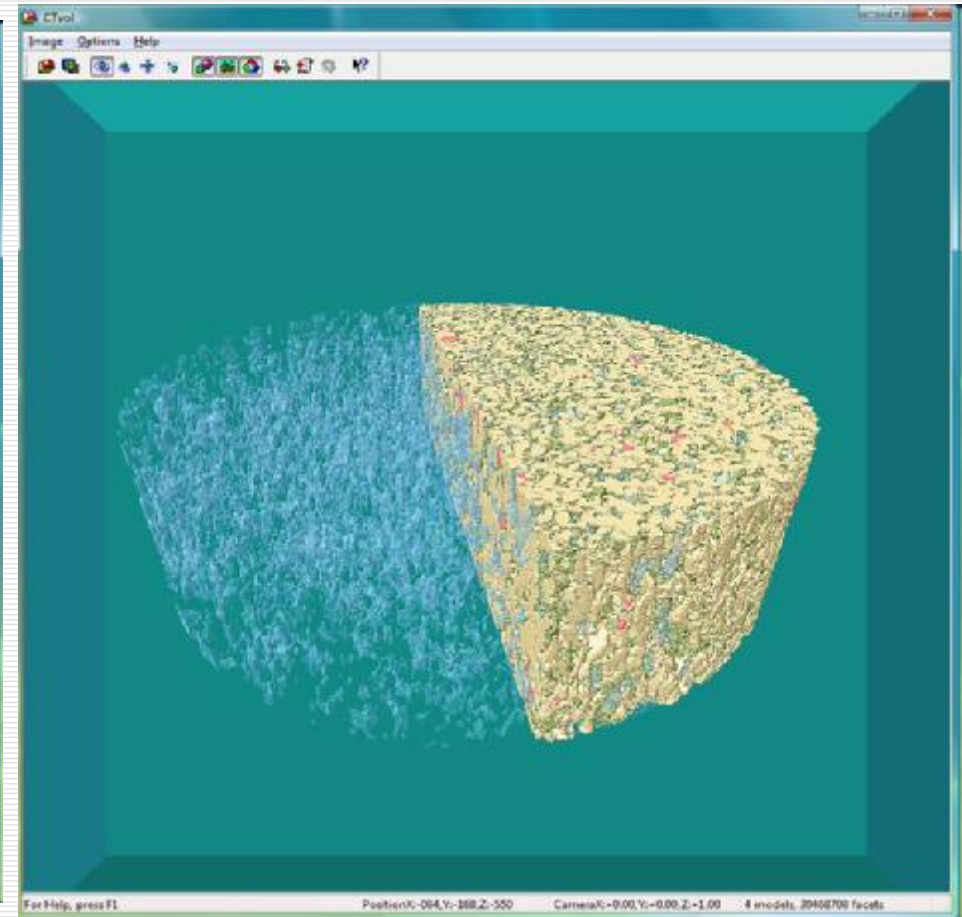
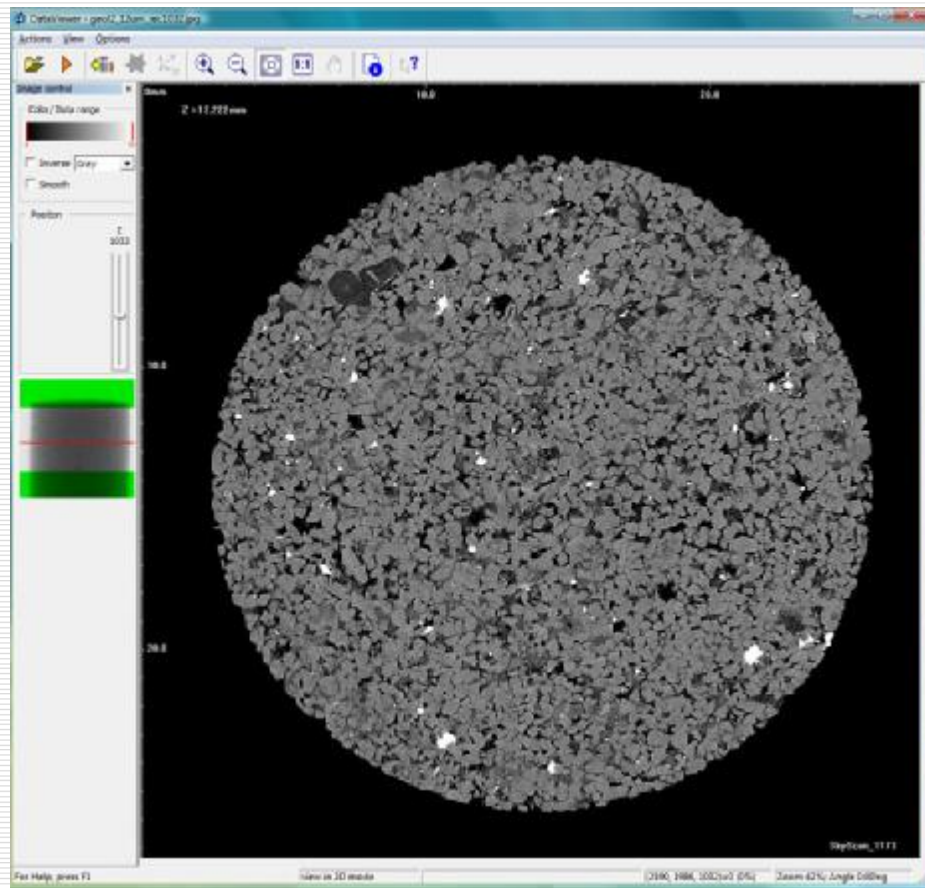
Содержания ценных редких элементов и ювелирных минералов измеряются в граммах на тонну. Даже в богатых рудах бывает необходимо просмотреть сотни шлифов, чтобы найти хотя бы одно зерно полезного минерала

Алмаз

Количественная оценка минерального состава

Для оценки количества рудных и аксессуарных минералов используют тяжелые или магнитные фракции

1. Визуальная оценка
2. Инструментальная оценка
3. Расчет из хим. состава породы
- 4. Автоматизированные методы**



3D-томограф SkyScan, геологический факультет МГУ

Почему нужно изучать кристаллооптику и петрографию?

- Для предварительного изучения образца на электронном микроскопе и микрозонде необходимо 3-4 часа
 - На подготовку препаратов для масс-спектрометров уходят недели
 - Средняя себестоимость 1 часа приборного времени колеблется от 1000 до 10000 руб.
 - Знание кристаллоптики, минералогии и петрографии экономит деньги, а главное время.
-