

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(СПбГУ)

Институт наук о Земле  
Кафедра петрографии

**Лисовский Глеб Александрович**  
**Выпускная квалификационная работа**  
**ПЕТРОЛОГИЯ КСЕНОЛИТОВ ГРАНУЛИТОВ ИЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ**  
**ДИАТРЕМЫ НЮРБИНСКАЯ, ЯКУТИЯ**

Уровень образования: *Магистратура*  
*Направление 05.04.01 «Геология»*

**Научный Руководитель:**

Корешкова Марина Юрьевна  
к.г.-м.н. доцент кафедры петрографии Института Наук о Земле СПбГУ

**Рецензент:**

Ларионов Александр Николаевич  
к.г.-м.н. старший науч. Сотр., Всероссийский научно-исследовательский институт  
им. А.П.Карпинского

Санкт-Петербург  
2024

## Содержание

Введение.....	3
Фактический материал .....	6
Методы исследования.....	8
Минералогия.....	9
Образец Nur-1 .....	9
Образец Nur-11 .....	11
Образец Nur-35 .....	14
Реконструкция состава .....	18
Оценка параметров образования и РТ истории пород .....	21
Классическая термобарометрия.....	21
Построение фазовых диаграмм.....	23
Оценка глубины образования .....	29
Интерпретация РТ пути и возраста ксенолитов по литературными данным.....	30
Выводы.....	32
Благодарности .....	33
Список литературы .....	34

## Введение

Изучение пород фундамента древних кратонов, а в особенности Сибирского кратона, зачастую осложнено их глубоким залеганием под осадочным чехлом. А нижняя кора и вовсе недоступна. Одним из способов его исследования является изучение состава и термальной истории глубинных ксенолитов гранулитов из кимберлитовых трубок (*Griffin et al., 1999*). Ксенолиты содержат как информацию о породах фундамента непосредственно на момент их выноса на поверхность, так и следы их термической истории с момента образования протолита. Главную сложность интерпретации современного состава ксенолитов представляет то, что при контакте с агрессивным расплавом кимберлита, пускай и почти мгновенным в рамках геологического времени, происходит их частичное замещение на постмагматической стадии, из-за чего требуется реконструкция первичного состава.

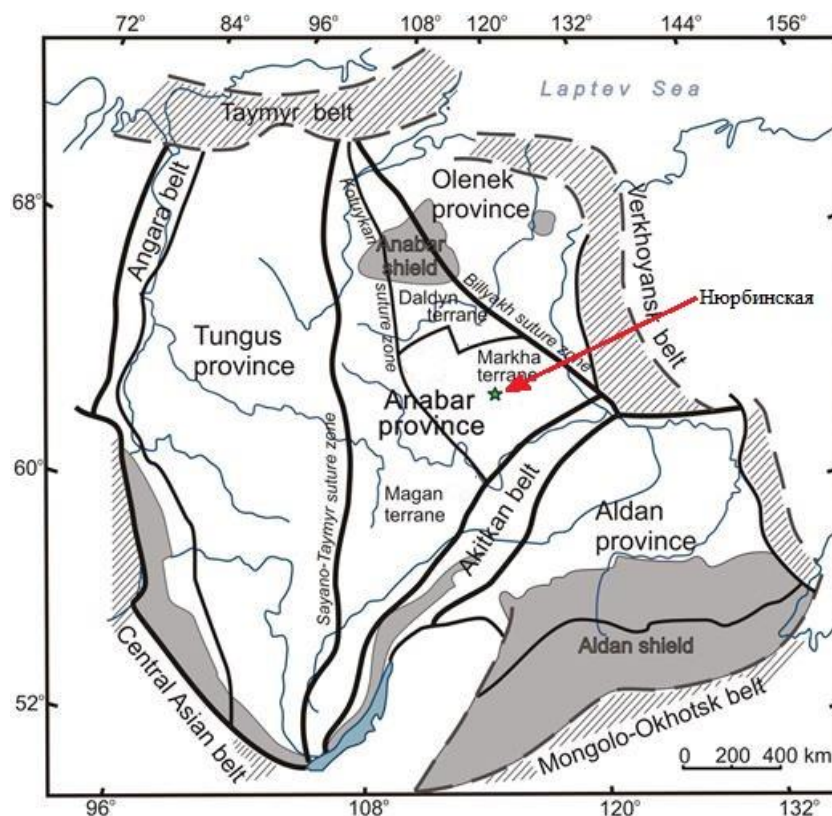


Рис. 1. Схематическая карта Сибирского кратона с обозначением границ террейнов кратона. На карте обозначена кимберлитовая трубка Нюрбинская в составе Накынского алмазоносного поля (*Rosen et al., 2006*)

На Сибирском кратоне находится множество кимберлитовых трубок, датированных девоном и поздней юрой (*Kinny et al., 1997*), скопления которых

разделяют на кимберлитовые поля. Сам кратон подразделяется на четыре провинции: тунгусскую, алданскую, оленёкскую и анабарскую (*Rosen et al., 2006, Griffin et al., 1999*). Анабарская провинция, в свою очередь, подразделяется на четыре террейна. Ксенолиты, исследуемые в данной работе, извлечены из трубки Нюрбинская, относящейся к Накынскому кимберлитовому полю, расположенному на Мархинском террейне Анабарской провинции (Рис.1).

В основном, в работах по изучению ксенолитов из кимберлитовых трубок региона предпочтение отдают двупироксеновым гранулитам (которые относят к нижнекоровым) (*Koreshkova et al, 2011, Shatsky et al, 2005*) и эклогитам, которые интерпретируются, как мантийные породы (*Spetsius, 2003, Agashev, 2018*). Ксенолитам фельзических, богатых плагиоклазом пород не уделено внимания, они могут представлять собой как преобразованные в условиях гранулитовой фации метаморфизма породы верхних горизонтов нижней коры, так и метапелиты средней коры.

Ксенолиты из трубки Нюрбинская, рассматриваемые в данной работе, представляют собой фельзические Grt-гранулиты. Всего представлено три образца:

1. Nur-1 - Амфибол-содержащий гранатовый гранулит
2. Nur-11 - Гранатовый гранулит, в минеральной ассоциации которого представлен корунд и кианит.
3. Nur-35 - Клинопироксен-кварц-скаполит-содержащий гранатовый гранулит

Цели работы:

- Определение P-T-условий образования минеральных ассоциаций фельзических ксенолитов (Nur-1, Nur-11, Nur-35)
- Реконструкция P-T истории пород ксенолитов

Задачи работы:

- Реконструкция состава пород, посредством изучения состава минералов и расчётом модального состава, анализ реконструированного химического состава пород с последующей интерпретацией протолита.
- Построение P-T диаграмм при помощи программы *Perple\_X* и интерпретация P-T истории пород с использованием методов классической термобарометрии.
- Сопоставление P-T истории изучаемых ксенолитов с литературными данными.

Практическое значение работы составляет то, что за счёт комплексного изучения ксенолитов разных типов нижнекоровых пород (в том числе фельзических) можно реконструировать состав и термическую историю горизонтов коры, для которых доступны лишь современные геофизические данные. Главной перспективой аккумуляции большого массива данных о истории нижнекоровых ксенолитов из кимберлитовых трубок Сибирского кратона является возможность картирования нижних горизонтов и геотектонической интерпретации глобальной истории региона.

Защищаемые положения:

1) Ксенолиты (Nur-1, Nur-11, Nur-35), вынесенные трубкой Нюрбинская, представляют нижнюю кору Сибирского кратона. Их протолитами являлись плагиоклазовые породы.

2) Протолит породы ксенолита Nur-35 был преобразован в условиях гранулитового метаморфизма и находился длительное время при стабильных условиях: 0,83 GPa и 660 °C.

Протолит породы ксенолита Nur-1 испытал пиковые условия метаморфизма при 1,33 GPa 880 °C, а настоящая минеральная ассоциация связана с декомпрессией и остыванием породы до 1 GPa и 720 °C.

Протолит породы ксенолита Nur-11 испытал декомпрессию с 1,09 до 0,95 GPa при 670 C, в следствии чего, шёл процесс разложения корунда с образованием биотита и амфибола.

## Фактический материал

Ксенолиты представляют собой изометричные тела 6 см в поперечнике, по краям (до 1 см) сильно преобразованные кимберлитовым расплавом. Также вторичные замещения распространяются по трещинам вглубь образца (Рис.2). Замещение серпентин-хлорит-каливошпатовым агрегатом преимущественно затрагивают плагиоклаз, пироксен и водосодержащие минералы. Важно отметить, что хлорит, серпентин и калиевый шпат образуются не непосредственно во время внедрения, а на постмагматической стадии при переработке флюидами как кимберлита, так и вмещающих пород, и ксенолитов.

Для дальнейшего изучения, вторичную корку отсекают (Рис.2), но внутренние преобразования требуют их тщательного учёта при расчёте составов минералов и модального состава всей породы. Поэтому, модальный состав рассчитывался по площадному соотношению минералов на BSE фотографиях шлифов, с интерпретацией первичного состава замещённых фаз по реликтам, текстурным особенностям замещений и составу вторичного агрегата (Таблица 1).

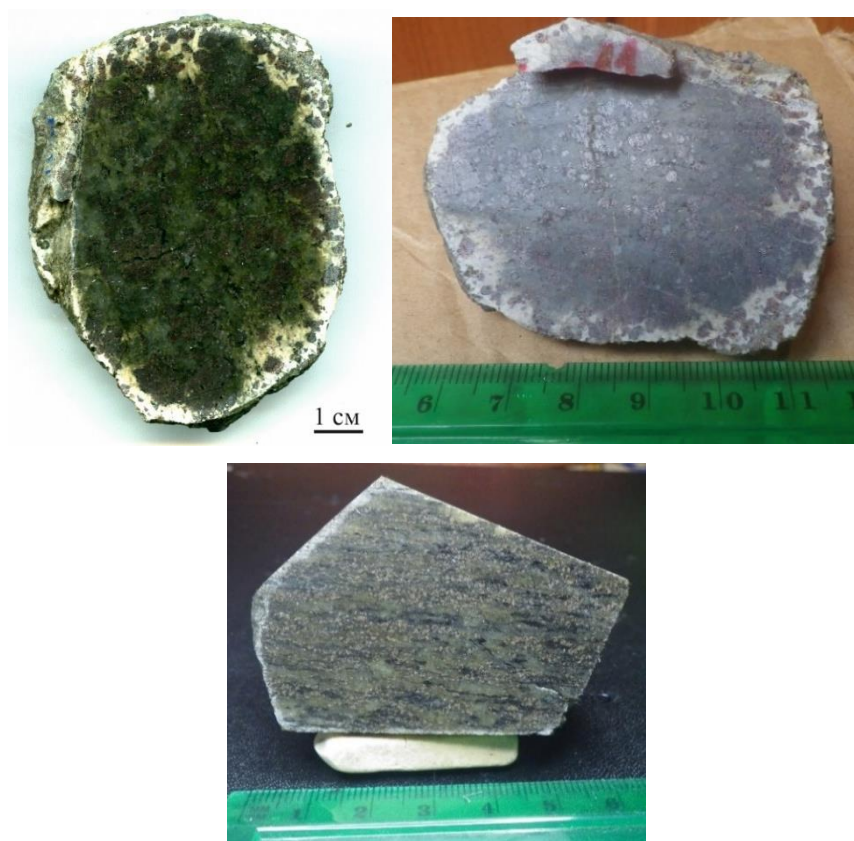


Рис. 2. Фотографии образца ксенолита Nur-1 до и после обработки

Таблица 1 Модальные составы для образцов, рассчитанные по BSE фотографиям

Минерал	Nur-1	Nur-11	Nur-35
Плагиоклаз	67,0	67,1	62,8
Гранат	22,5	29,9	12,7
Амфибол	5,0		1,0
Бiotит	0,1	1,2	
Клинопироксен	2,0		8,5
Скаполит			6,4
Кварц			7,9
Кианит		0,6	
Корунд		0,4	
Рутил	0,9	0,8	0,3
Ильменит	1,2	0,02	0,3
Апатит	0,8		0,1
Титанит	0,5		

## Методы исследования

Петрографические и минералогические описания шлифов пород проводились с помощью микроскопов ПОЛАМ Л-213М с фото приставкой в ФГБУ ВСЕГЕИ и Leica DM750 P на кафедре петрографии СПбГУ. Валовый химический состав пород на главные элементы определялся методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (XRF) на вакуумном спектрометре последовательного действия с дисперсией по длине волны ARL 9800 (ФГБУ ВСЕГЕИ). Анализы минералов на редкие и рассеянные элементы проводились посредством лазерно-абляционной масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (LA-ICP-MS) на масс-спектрометре высокого разрешения с ионизацией в индуктивно-связанной плазмой New Wave UP193FX с приставкой PerkinElmer SCIEX ELAN DRC (the Geological Institute, BAS, Bulgaria). Микронзондовые исследования минералов проводились при помощи сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N с приставкой для энерго-дисперсионного анализа Oxford Instruments X-Max 20 (ресурсный центр СПбГУ «Геомодель»), а также настольного растрового электронного микроскоп-микроанализатора Hitachi TM-3000 (ресурсный центр микроскопии и микроанализа СПбГУ). Модальный состав определён с помощью анализа BSE фотографий программным обеспечением ImageScore. Реконструкция состава породы велась пересчётом модального состава на плотности минеральных видов по Трёгеру (1958). Построение фазовых диаграмм производилось с использованием программы *Perple\_X* (Connolly, 2005), основанной на методе минимизации энергии Гиббса для известного реконструированного химического состава породы.



# Минералогия

## Образец Nur-1

Амфибол-содержащий гранатовый гранулит. Структура порфиробластовая с гранобластовой основной массой.

Таблица 2 Модальный состав образца Nur-1

Минерал	Плагиоклаз	Гранат	Амфибол	Клинопироксен	Ильменит	Рутил	Апатит	Титанит	Биотит
%	67,0	22,5	5,0	2,0	1,2	0,9	0,8	0,5	0,1

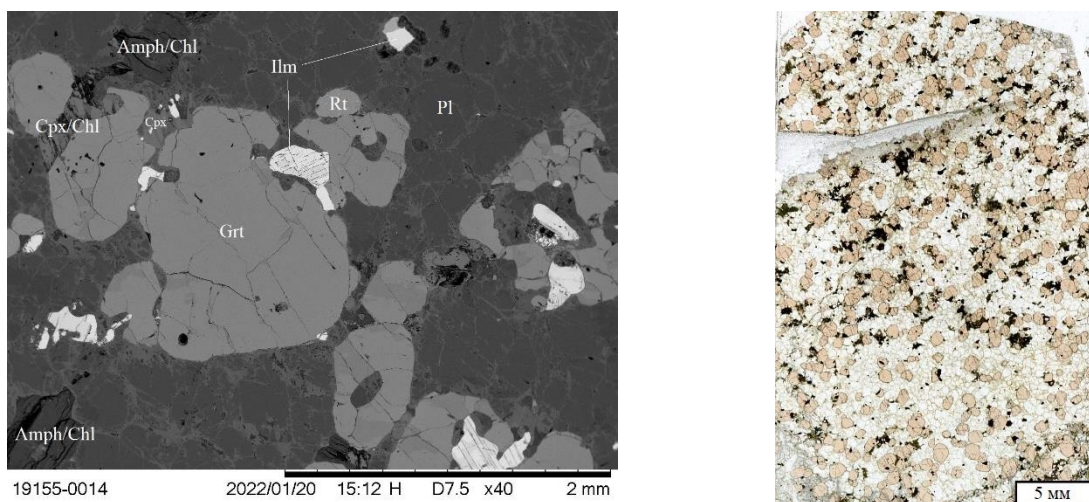


Рис. 3. BSE-фотография участка шлифа Nur-1 (Слева)  
(Grt – гранат, Cpx – клинопироксен, Pl – плагиоклаз, Rt – рутил, Ilm – ильменит, Amph – амфибол, /Chl – замещения хлоритом.)

Фотография шлифа Nur-1 в проходящем свете (Справа)  
(светлые участки – плагиоклаз и вторичные замещения, розовые – гранат, тёмные – рудная фаза)

Средние составы минералов:

Таблица 3 Средние составы минералов образца Nur-1 по результатам микрозондового анализа

Масс %	Плагиоклаз	Амфибол	Гранат	Клинопироксен	Рутил	Ильменит	Титанит
SiO <sub>2</sub>	63,23	40,56	38,50	50,58	0,08	0	28,07
TiO <sub>2</sub>	0	3,14	0,09	0,59	99,13	51,98	41,73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,83	12,80	21,36	3,95	0	0	1,85
FeO	0	13,11	24,37	9,71	0,22	45,78	0,57
MnO	0	0	0,43	0	0	0,09	0
MgO	0	11,68	6,78	11,94	0	1,36	0,00
CaO	4,94	11,56	8,47	22,36	0,06	0	27,50
Na <sub>2</sub> O	8,43	1,96	0	1,20	0	0	0
K <sub>2</sub> O	0,43	2,03	0	0	0	0	0
Сумма	99,86	96,84	100,00	100,33	99,48	99,20	99,73

Формулы минералов для средних составов:

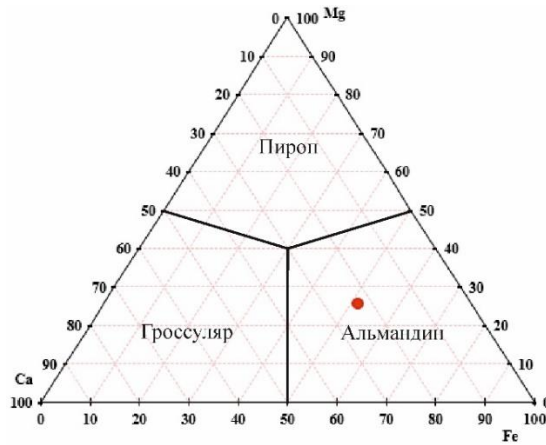
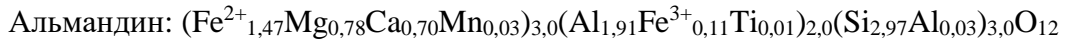
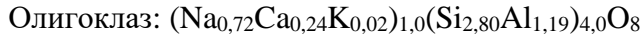


Рис. 4. Классификационная диаграмма для среднего состава граната образца Nur-1

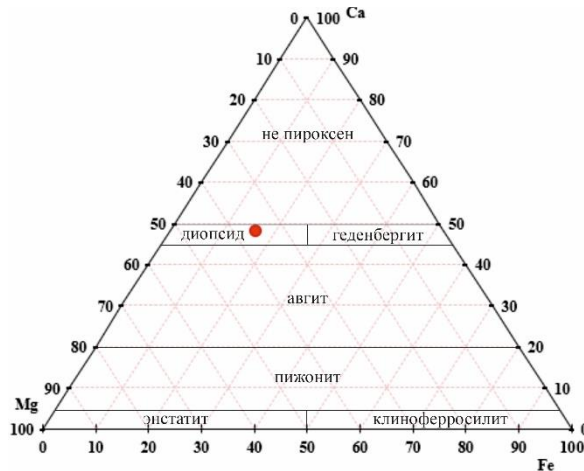
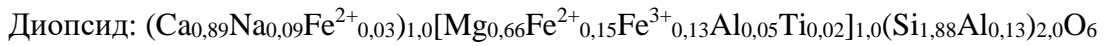
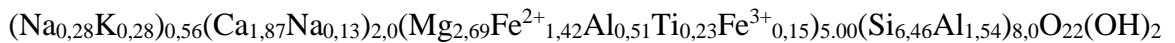


Рис. 5. Классификационная диаграмма для среднего состава пироксена образца Nur-1

Паргасит:



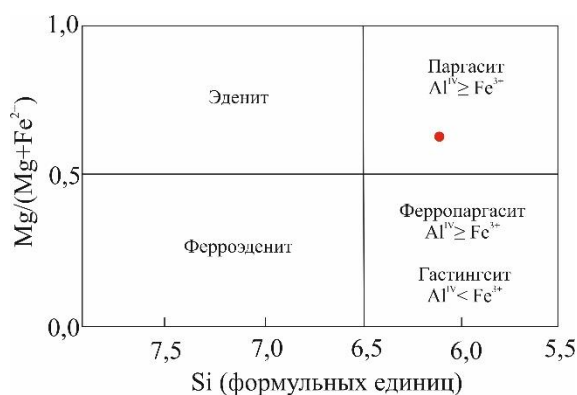


Рис. 6. Классификационная диаграмма для среднего состава кальциевого амфибола образца Nur-1

Рассчитанные формульные единицы для минералов:

Таблица 4 Рассчитанные формульные единицы для средних составов минералов образца Nur-1

Ф.е.	Плагиоклаз	Амфибол	Гранат	Клинопироксен	Ильменит	Титанит
Si	2,80	6,10	2,97	1,88	0	0,91
Ti	0	0,36	0,01	0,02	0,66	1,02
Al	1,19	2,27	1,94	0,17	0	0,07
Fe	0	1,65	1,57	0,30	0,65	0,02
Mn	0	0	0,03	0	0	0
Mg	0	2,62	0,78	0,66	0,03	0,07
Ca	0,24	1,86	0,70	0,89	0	0,96
Na	0,72	0,57	0	0,09	0	0
K	0,02	0,39	0	0	0	0

Зерна граната зональны, характеризуются уменьшением магнезиальности и содержания Са от центра к краю. При этом состав меняется в пределах кайм 200-300 мкм шириной, тогда как состав центральных частей зерен остается постоянным. Такая зональность, вероятно, обусловлена диффузионным обменом с диопсидом в ходе декомпрессии и понижении температуры.

### Образец Nur-11

Гранатовый гранулит. Структура порфиробластовая с гранобластовой основной массой.

Модальный состав:

Таблица 5 Модальный состав образца Nur-11

Минерал	Плагиоклаз	Гранат	Биотит	Рутил	Кианит	Корунд	Ильменит
%	67,1	29,9	1,2	0,8	0,6	0,4	0,02

На BSE фотографиях шлифа (Рис.7) видим, что:

- 1) Краевые части граната содержат включения полигонального корунда, когда как в основной массе породы корунд слагает неправильные агрегаты.
- 2) Кианит формирует неправильные выделения как в основной массе породы, так и рядом с зёрнами граната
- 3) Рутил содержится как во включениях в гранате, так и в основной части породы.

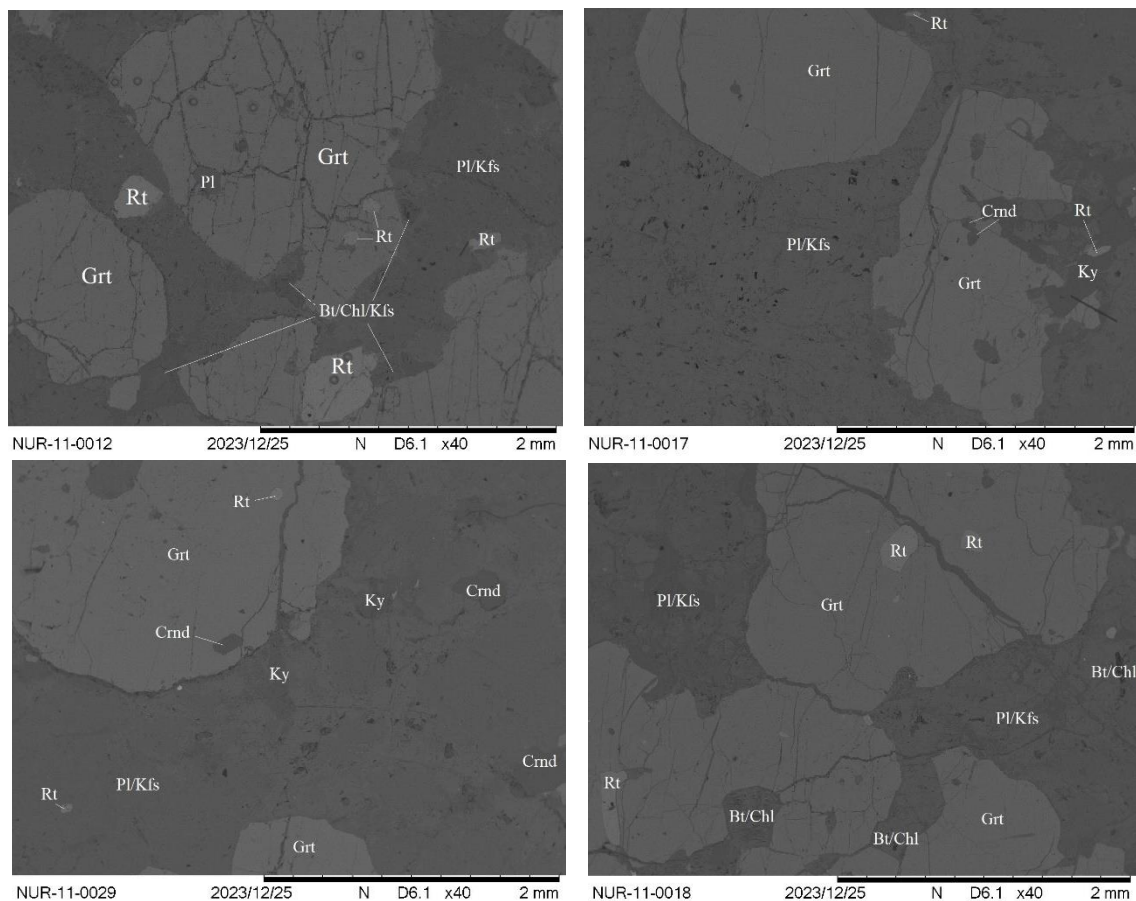


Рис. 7. BSE-фотографии шлифа Nur-11

(Grt – гранат, Bt – биотит, Pl – плагиоклаз, Rt – рутил, /Chl – замещения хлоритом, /Kfs – замещения калиевым шпатом, Ky – кианит, Crnd – корунд)

#### Средние составы минералов:

Таблица 6 Средние составы минералов образца Nur-11 по результатам микрозондового анализа

Вес %	Гранат	Плагиоклаз	Биотит	Кианит	Ильменит
SiO <sub>2</sub>	38,99	56,07	34,74	36,93	0
TiO <sub>4</sub>	0	0	0	0	54,10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,58	28,07	18,12	62,38	0
FeO	24,36	0	20,06	0,69	43,44
MnO	0,56	0	0,12	0	0,39
MgO	7,54	0	9,47	0	2,06
CaO	6,97	10,39	0	0	0
Na <sub>2</sub> O	0	5,18	0	0	0

K <sub>2</sub> O	0	0,29	9,84	0	0
Сумма	100,00	100,00	92,36	100,00	100,00

Формулы минералов для средних составов:

Альмандин -  $(\text{Fe}^{2+}_{1,524}\text{Mg}_{0,865}\text{Ca}_{0,575}\text{Mn}_{0,036})_{3,0}(\text{Al}_{1,957}\text{Fe}^{3+}_{0,043})_{2,0}\text{Si}_{3,0}\text{O}_{12}$



Рис. 8. Классификационная диаграмма для среднего состава граната образца Nur-11

Лабрадор -  $(\text{Ca}_{0,50}\text{Na}_{0,45}\text{K}_{0,02})_{0,97}(\text{Si}_{2,53}\text{Al}_{1,49})_{4,02}\text{O}_8$

Биотит флогопит-аннитового ряда -  $\text{K}_{1,01}(\text{Fe}_{1,35}\text{Mg}_{1,13}\text{Al}_{0,50})_{2,98}(\text{Si}_{2,79}\text{Al}_{1,21}\text{O}_{10})(\text{OH})_2$

Рассчитанные формульные единицы для средних составов минералов:

Таблица 7 Рассчитанные формульные единицы для средних составов минералов образца Nur-11

Ф.е.	Гранат	Плагиоклаз	Биотит	Кианит	Ильменит
Si	3,00	2,53	2,75	1,00	0
Ti	0	0	0	0	1,01
Al	1,96	1,49	1,69	1,98	0
Fe	1,57	0	1,33	0,02	0,90
Mn	0,04	0	0,01	0	0,01
Mg	0,87	0	1,12	0	0,08
Ca	0,57	0,50	0	0	0
Na	0	0,45	0	0	0
K	0	0,02	0,99	0	0

В породе гранат имеет зональность с уменьшением магниальности и содержания Ca от центра к краю. Так же, как и в гранате образца Nur-1, состав меняется в пределах узких кайм 200-300 мкм шириной, тогда как состав центральных частей зерен остается постоянным. Важно отметить, что состав краевых частей зёрен плагиоклаза более основной, чем составы центральных частей. Такая зональность, вероятно, имеет диффузионную природу.

## Образец Nur-35

Гранатовый гранулит. Структура пойкило-бластовая с гранобластовой основной массой. Текстура полосчатая.

Модальный состав:

Таблица 8 Модальный состав образца Nur-35

Минерал	Плагиоклаз	Гранат	Клинопироксен	Кварц	Скаполит	Амфибол	Рутил	Ильменит	Апатит
%	62,8	12,7	8,5	7,9	6,4	1,0	0,3	0,3	0,1

На BSE фотографиях (Рис.9) шлифа видим, что:

- 1) Для породы характерна полосчатая текстура, главным образом выраженная полосами кварца, как наиболее пластичного минерала. Из-за того, что ориентировку имеют все минералы, текстура, вероятно, наложенная и обусловлена пластическим течением.
- 2) Гранат имеет пойкилитовую структуру, что может говорить о его одновременном росте с остальной ассоциацией и реакцией образования граната и кварца за счёт клинопироксена и плагиоклаза.
- 3) Амфибол подвержен замещением хлоритовым агрегатом в гораздо меньшей степени, чем клинопироксен. Это объясняется тем, что при воздействии флюида, безводный пироксен менее устойчив к замещению.



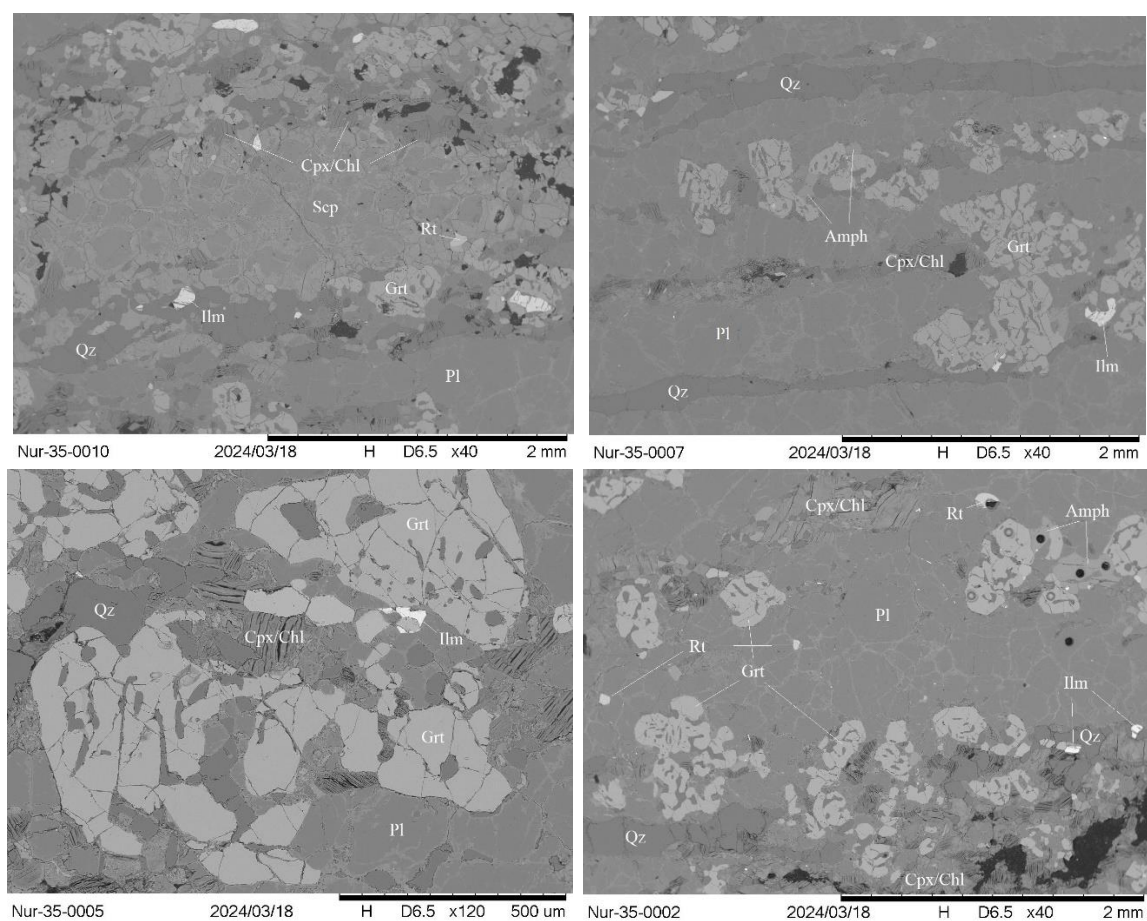


Рис. 9. BSE-фотографии шлифа Nur-35

Grt – гранат, Bt – биотит, Pl – плагиоклаз, Rt – рутил, Ilm – ильменит, Qz – кварц, Cpx – клинопироксен, Amph – амфибол, /Chl – замещения хлоритом, Scp - скаполит

Средние составы минералов:

Таблица 9 Средние составы минералов образца Nur-35 по результатам микрозондового анализа

W%	Плагиоклаз	Гранат	Клинопироксен	Скаполит	Амфибол	Ильменит	Апатит
SiO <sub>2</sub>	62,48	39,62	51,00	48,85	44,05	0	0
TiO <sub>2</sub>	0	0	0,40	2,09	2,09	50,86	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,50	21,72	3,64	25,68	11,89	0	0
FeO	0	24,88	8,05	0,53	12,83	48,90	0
MnO	0	0,69	0	0	0	0	0
MgO	0	8,13	13,41	0,12	12,30	1,86	0
CaO	6,02	6,18	22,95	16,20	11,88	0	55,33
Na <sub>2</sub> O	7,31	0	1,05	4,15	1,45	0	0
K <sub>2</sub> O	0,75	0	0	0,06	1,49	0	0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	0	0	0	0	43,88
SO <sub>4</sub>	0	0	0	4,86	0	0	0
Сумма	101,06	101,22	100,49	102,53	97,97	101,62	99,21

Формулы минералов для средних составов:

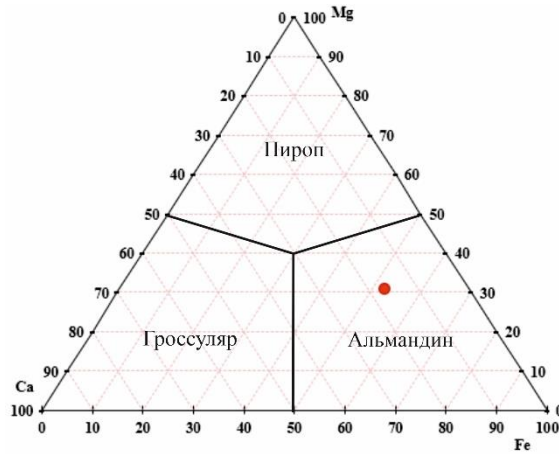
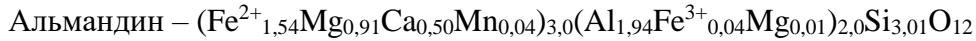


Рис. 10. Классификационная диаграмма для среднего состава граната образца Nur-35

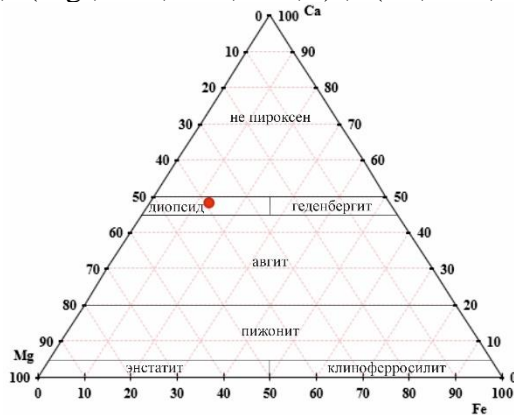


Рис. 11. Классификационная диаграмма для среднего состава пироксена образца Nur-35

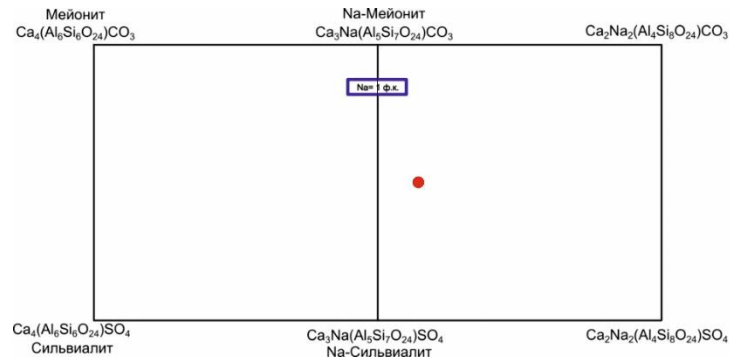
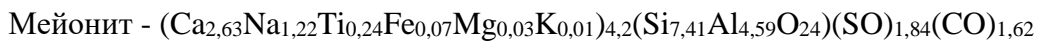
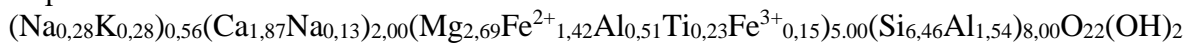


Рис. 12. Классификационная диаграмма для среднего состава скаполита образца Nur-35

Паргасит -





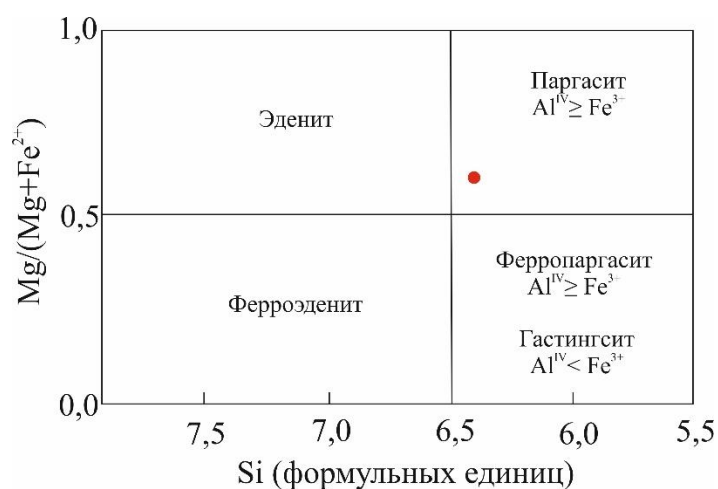


Рис. 13. Классификационная диаграмма для среднего состава кальциевого амфибола образца Nur-35

Рассчитанные формульные единицы для средних составов минералов:

Таблица 10 Рассчитанные формульные единицы для средних составов минералов образца Nur-35

Ф.е.	Плагиоклаз	Гранат	Клинопироксен	Скаполит	Амфибол	Ильменит	Апатит
Si	2,77	3,01	1,90	7,41	6,46	0	0
Ti	0	0	0,01	0,24	0,23	0,96	0
Al	1,28	1,94	0,16	4,59	2,05	0	0
Fe	0	1,58	0,25	0,07	1,57	1,02	0
Mn	0	0,04	0	0	0	0	0
Mg	0	0,92	0,74	0,03	2,69	0,07	0
Ca	0,29	0,50	0,91	2,63	1,87	0	4,68
Na	0,63	0	0,08	1,22	0,41	0	0
K	0,04	0	0	0,01	0,28	0	0
P	0	0	0	0	0	0	2,93
S	0	0	0	0,46	0	0	0
C	0	0	0	0,54	0	0	0
H	0	0	0	0	2,00	0	2,00

## Реконструкция состава

Для пород был реконструирован состав (Таблица 11) по площадному соотношению породообразующих минералов и табличным данным для плотностей минеральных видов по Трёгеру В.Е. (1968). Значения плотностей выбирались с помощью диаграмм составов, чтобы максимально соответствовать средним составам минералов в образцах.

Таблица 11 Реконструированный состав пород

W%	Nur-1	Nur-11	Nur-35
SiO <sub>2</sub>	51,71	48,23	58,23
TiO <sub>2</sub>	2,43	1,16	0,74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,60	25,75	19,82
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	9,86	9,62	5,42
MnO	0,12	0,22	0,12
MgO	2,96	3,01	2,82
CaO	7,25	8,72	7,84
Na <sub>2</sub> O	5,03	3,01	4,56
K <sub>2</sub> O	0,37	0,28	0,45
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,37		

Если сравнивать составы рассчитанные таким способом с валовыми составами, измеренными методом XRF, то видим, что при отсутствии учёта вторичных изменений, значения CaO и Na<sub>2</sub>O занижаются, а K<sub>2</sub>O завышаются (Рис.14). Т.к. вторичная минерализация связана с привнесом этих элементов кимберлитом.

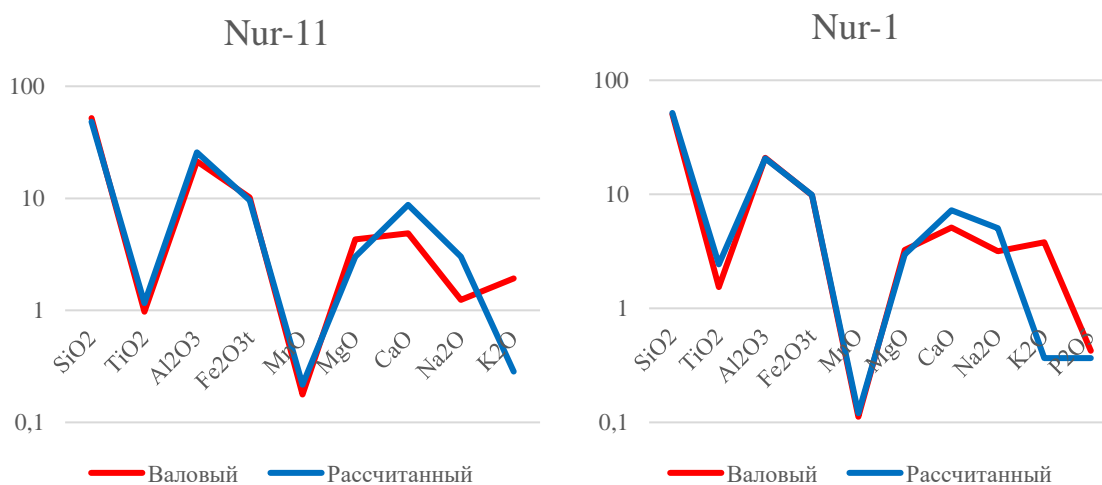


Рис. 14. Сравнительные графики валового и рассчитанного состава для образцов Nur-11 и Nur-1

По этим данным состав пород был вынесен на TAS диаграмму для интрузивных пород (Рис.15), где образец Nur-1 попадает в поле габбро-диоритов (для монцо-габбро-диоритов слишком низкие значения  $K_2O$ ), Nur-11 в поле габбро, а Nur-35 в поле диоритов.

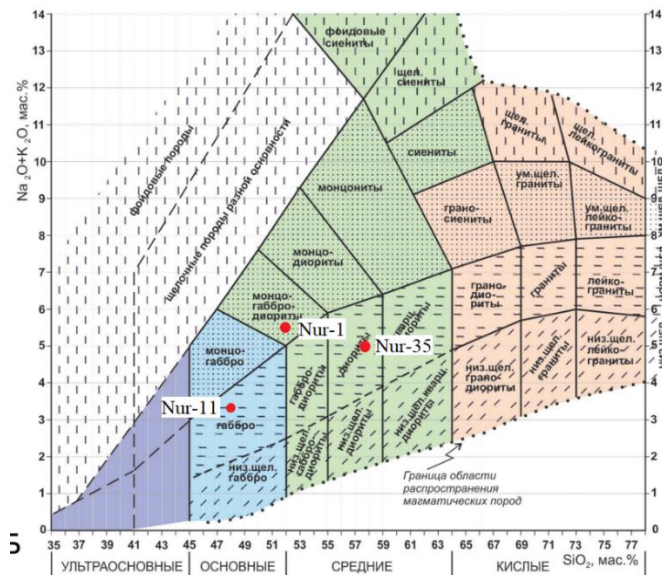


Рис. 15. TAS диаграмма для интрузивных пород с составами образцов ксенолитов (Шарпенюк и др., 2013)

Затем были рассчитаны нормативные составы по методу CIPW (Таблица 12). В результате, пересчёты для Nur-1 и Nur-11 отвечают лейкогабброноритам, а Nur-35 – кварцевому диориту. При этом все образцы соответствуют кварц-нормативным породам, а Nur-11 – корунд-нормативным.

Таблица 12. Результаты пересчёта реконструированного состава пород по методу CIPW (в %).  
 ab – альбит, an – анортит, or – ортоклаз, hy – гиперстен, mt – магнетит, il – ильменит, ap – апатит, di – диопсид, q – кварц, c – корунд.

	Nur-1	Nur-11	Nur-35
ab	42,56	26,11	39,11
an	32,54	44,26	32,70
or	2,19	1,72	2,71
hy	10,79	9,38	5,33
mt	5,71	5,71	3,18
il	4,62	2,25	1,42
ap	0,85		
di	0,84		5,39
q	0,60	5,82	10,16
c		4,75	
№Pl	42	61	44

Для образца Nur-11 был реконструирован состав РЗЭ по результатам точечного определения их содержания в минералах при помощи LA-ICP-MS и сравнён с литературными данными составов габброидов (*GEOROC Database*) (Рис.17).

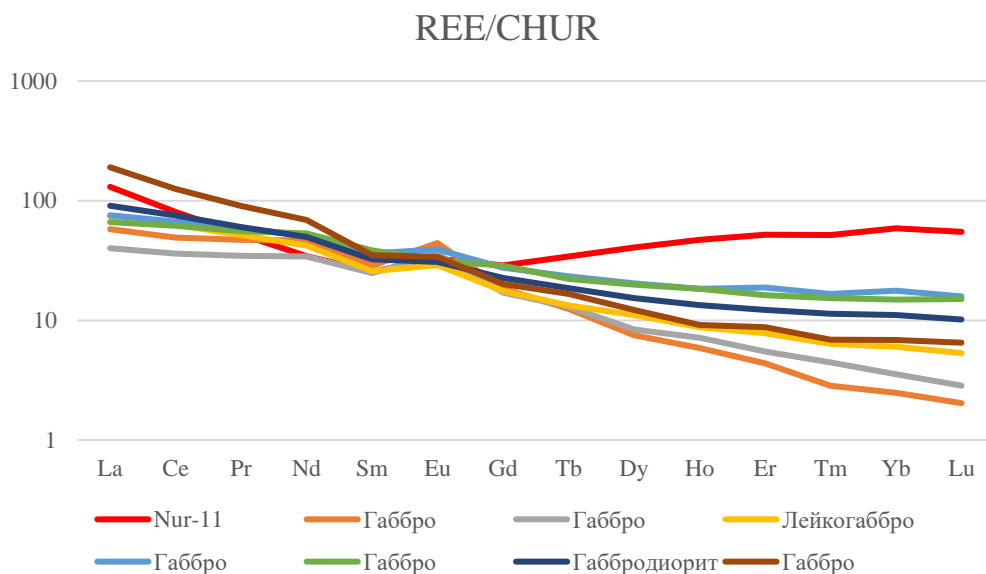


Рис. 16. Графики редких земель для образца Nur-11 и габброидов (*GEOROC Database*), нормированных на хондрит (*Sun and McDonough, 1989*)

Левая часть графика схожа с данными по габброидам, включая положительную европиевую аномалию, но содержания тяжёлых РЗЭ в образце завышено. Схожесть с габброидами объясняется большим количеством плагиоклаза в породе, а содержания тяжёлых РЗЭ вкладом большого количества граната, которое может быть связано с реститовой природой породы (Рис.18).

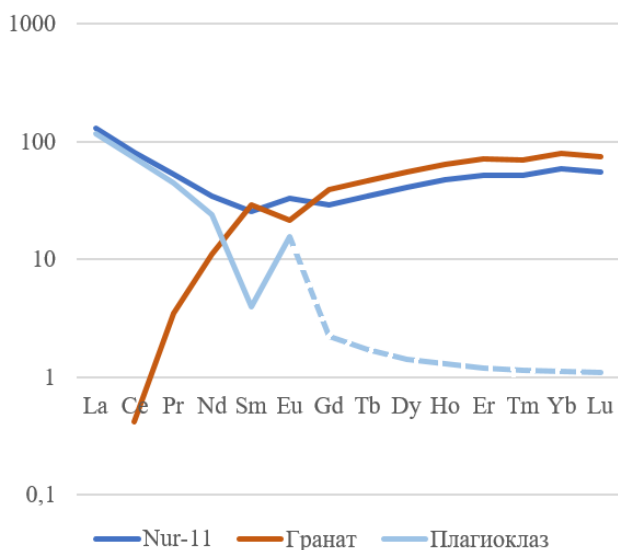


Рис. 17. Графики редких земель всей породы и отдельно граната и плагиоклаза, нормированных на хондрит (*Sun and McDonough, 1989*)

# Оценка параметров образования и РТ истории пород

## Классическая термобарометрия

Для образцов Nur-35 и Nur-1 был проведён расчёт температуры и давления образования методами термобарометрии по уравнениям гранат-плаггиоклаз-клинопироксенового геобарометра и гранат-клинопироксенового Fe<sup>2+</sup>-Mg геотермометра по экспериментальным данным Ньютона и Перкинса (*Newton & Perkins, 1982*) и Равны (*Ravna, 2000*). Данные геотермобарометры адаптированы для гранулитов и основаны на реакции клинопироксена с плаггиоклазом с образованием граната и кварца, чувствительной к изменению давления, и обмену железом и магнием между гранатом и клинопироксеном, чувствительном к изменению температуры. Все нужные фазы для реакции в образце Nur-35 присутствуют. Для образца Nur-1 расчёты будут использованы не как основной довод, а только как подкрепление интерпретаций фазовых диаграмм.

Формула расчёта давления (погрешность 1500 бар):

$$P_{Cpx}(\text{бар}) = 675 + 17,179 \cdot T + 3,5962 \cdot T \cdot \ln \frac{(a_{Ca}^2 \cdot a_{Mg})^{Gt}}{(a_{Ca}^{Pl}) \cdot (a_{CaMg}^{Cpx})}$$

где, а – содержание элемента в минерале в вес %

Pl - плаггиоклаз, Gt - гранат, Cpx – клинопироксен.

Формула расчёта температуры (погрешность ~50 °C):

$$T (C) = \left[ \left( 1939,9 + 3270 \cdot X_{Ca}^{Grt} - 1396 \cdot (X_{Ca}^{Grt})^2 + 3319 \cdot X_{Mn}^{Grt} - 3535 \cdot (X_{Mn}^{Grt})^2 + 1105 \cdot X_{Mg\#}^{Grt} - 3561 \cdot (X_{Mg\#}^{Grt})^2 + 2324 \cdot (X_{Mg\#}^{Grt})^3 + 169,4 \cdot P(GPa) \right) / (\ln K_D + 1,223) \right] - 273$$

где,  $K_D = (Fe^{2+} / Mg)^{Grt} / (Fe^{2+} / Mg)^{Cpx}$

$X_{Ca}^{Grt} = Ca / (Ca + Mn + Fe^{2+} + Mg)$  – отношения содержаний эл-та в гранате в вес %

$$X_{Mg\#}^{Grt} = Mg / (Mg + Fe^{2+})$$

Параметры были рассчитаны по приведённым к среднему результатам микронзондового анализа породообразующих минералов. Также были рассчитаны параметры для среднего состава центральных и краевых частей граната, но разница при расчётах, учитывающих зональность в гранате, находится в пределах погрешности (Таблица 13).

Таблица 13 Результаты PT расчётов для образца Nur-35

	P GPa	T °C
Средний состав граната	0,83	663
Центральные части граната	0,84	672
Краевые части граната	0,79	646

Для образцов Nur-1 и Nur-11 были рассчитаны зависимости температуры и давления от содержания Zr в рутиле (Tomkins *et al.*, 2007). Термометр основан на равновесии циркония в системе:  $ZrO_2$  (в рутиле) +  $SiO_2 = ZrSiO_4$  (Рис.18). В наблюдаемых ассоциациях кварца не наблюдается, но в статье Ферри и Вотсона (2007) было доказано, что данный термометр применим для пород без кварца и их уравнение даёт практически идентичные зависимости с погрешностью 60°C.

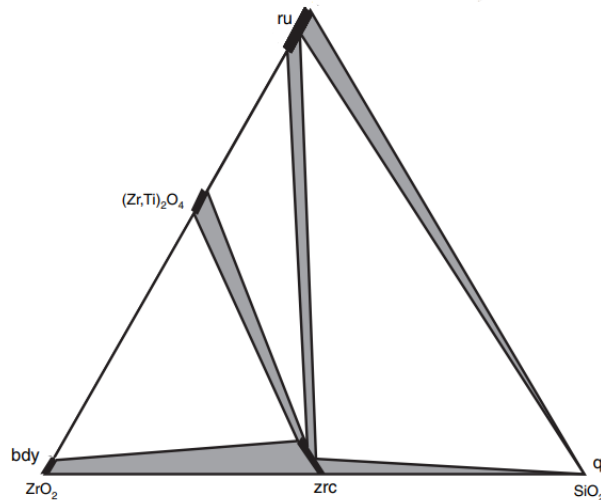


Рис. 18. Схема фазовых взаимоотношений в системе  $TiO_2-SiO_2-ZrO_2$  (не в масштабе) (Tomkins *et al.*, 2007)

Формула зависимости температуры и давления:

$$T (C) = \frac{83,9 + 4,10P}{0,1428 - R \ln(Zr \text{ ppm})} - 273$$

Измерение содержаний циркония в рутиле производилось методом LA-ICP-MS. Для образца Nur-1 были взяты содержания Zr в рутиле основной массы породы и включений рутила в гранате. Результаты расчётов приведены ниже, на фазовых диаграммах.

## Построение фазовых диаграмм

Для построения диаграмм фазовых равновесий была использована программа *Perple\_X* (Connolly, 2005), представляющая собой пакет термодинамических расчетов и баз данных, подходящая для быстрого создания фазовых диаграмм всех типов, создания псевдосечений (фазовых диаграмм, которые включают только те реакции, которые происходят в породе данного конкретного состава). Позволяет оценивать температуры и давления для породы конкретного состава. У программы нет графического интерфейса и управление происходит через консоль. Код для расчёта был написан Е.Ю. Акимовой, за что ей огромное спасибо.

Изначально были взяты рассчитанные ранее массовые составы для образцов Nur-1 и Nur-11, без учёта Mn, т.к. он является изоморфным компонентом и не образует минеральных собственных фаз. Была выбрана база данных Холанда и Пауланда (hp02ver.dat) (Holland, T., Powell, R., 1998), из-за её универсальности.

Модели твёрдых растворов были выбраны для минералов, наиболее подходящих по генезису породообразующим. Также были построены изоплеты для составов граната ( $x_{Mg}$ ,  $x_{Ca}$ ) и плагиоклаза ( $N_{Pl}$ ). Так как расчёты производились для водных условий, то после построения ряда диаграмм для разных значений  $x_{CO_2}$  в системе, были выбраны те, которые максимально отражают наблюдаемую минеральную ассоциацию и позволяют достичь равновесия для состава граната с другими фазами.  $x_{CO_2}=0,3$  для Nur-1 и  $x_{CO_2}=0,5$  для Nur-11.

В результате были получены фазовые диаграммы для каждого из образцов и изоплеты составов минералов. После чего, диаграммы были графически отредактированы и были нанесены как данные расчётов с использованием минеральных термобарометров, так и изоплеты, отражающие состав краевых и центральных частей минералов в образцах.





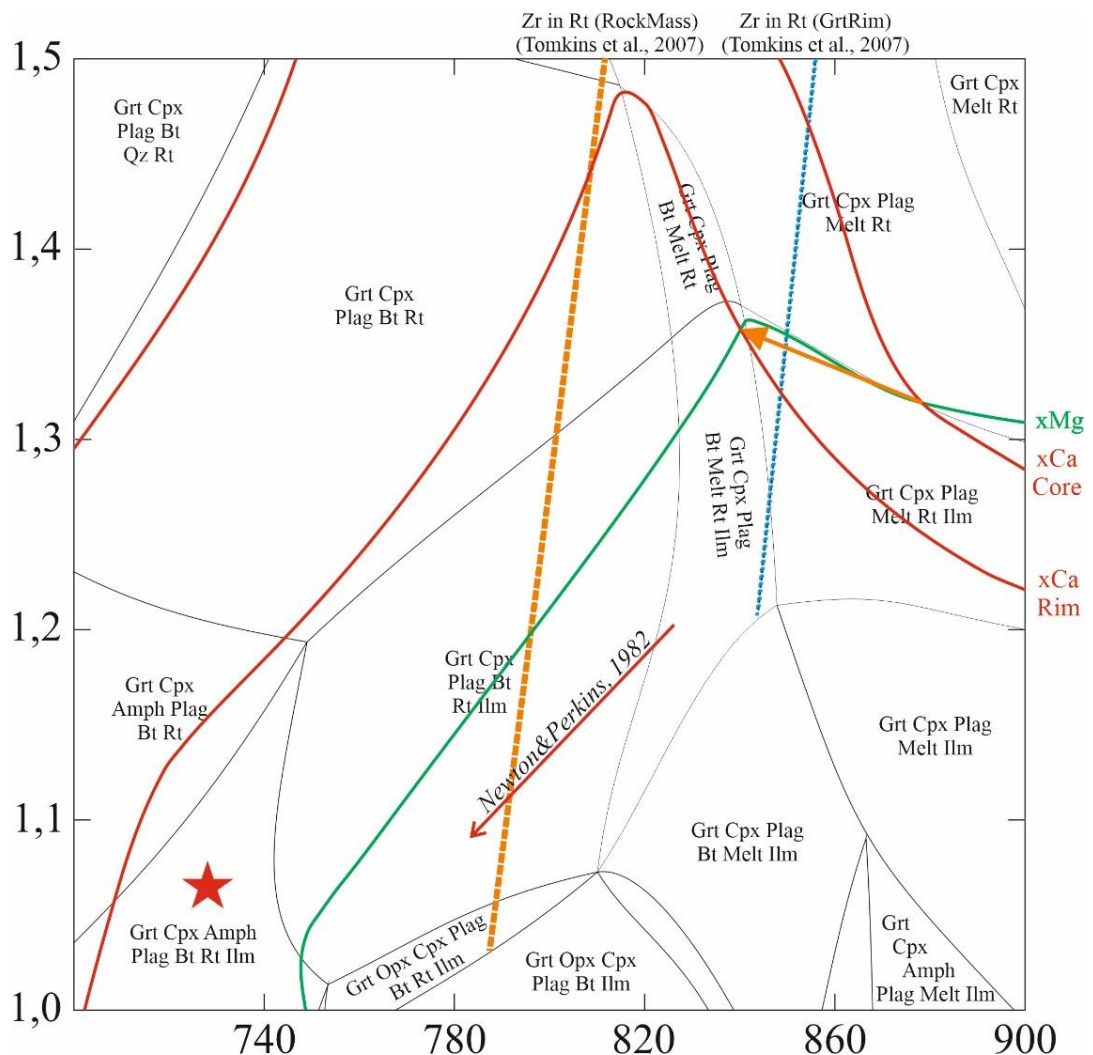


Рис. 20. Увеличенная диаграмма фазовых равновесий с изоплетами составов граната для обр. Nur-1. (По оси y – давление в GPa, а по оси x – температура в °C)

(Подписаны только поля, выраженные в масштабе)

Красной звездой отмечено поле наблюдаемой ассоциации породы

Красные линии – изоплеты xCa для краевых (xCa Rim) и центральных частей (xCa Core) граната, наблюдаемого в породе.

Зелёная линия – изоплета xMg для граната, наблюдаемого в породе.

Красная стрелка – результаты термобарометрии (Newton & Perkins, 1982).

Оранжевая пунктирная линия – зависимость содержания Zr в рутиле от температуры и давления (Tomkins et al., 2007) для состава рутила в основной массе породы.

Голубая пунктирная линия – зависимость содержания Zr в рутиле (Tomkins et al., 2007) для состава включений рутила в гранате.

Оранжевая стрелка – предполагаемая PT-история граната.

Расшифровка фаз: (Bt – биотит, Melt – расплав, Plag – плагиоклаз, Cpx – клинопироксен, Opx – ортопироксен, Grt – гранат, Qtz – кварц, Rt – рутил, Ilm – ильменит)

По построениям (Рис.19,20) можно сделать вывод, что гранат и включения в нём рутила в породе сохранили информацию о пиковых условиях метаморфизма при 850-880 С и 1,3 GPa. Затем, при остывании и декомпрессии до 720 С и 1 GPa, образовалась настоящая минеральная ассоциация породы, включая рутил основной



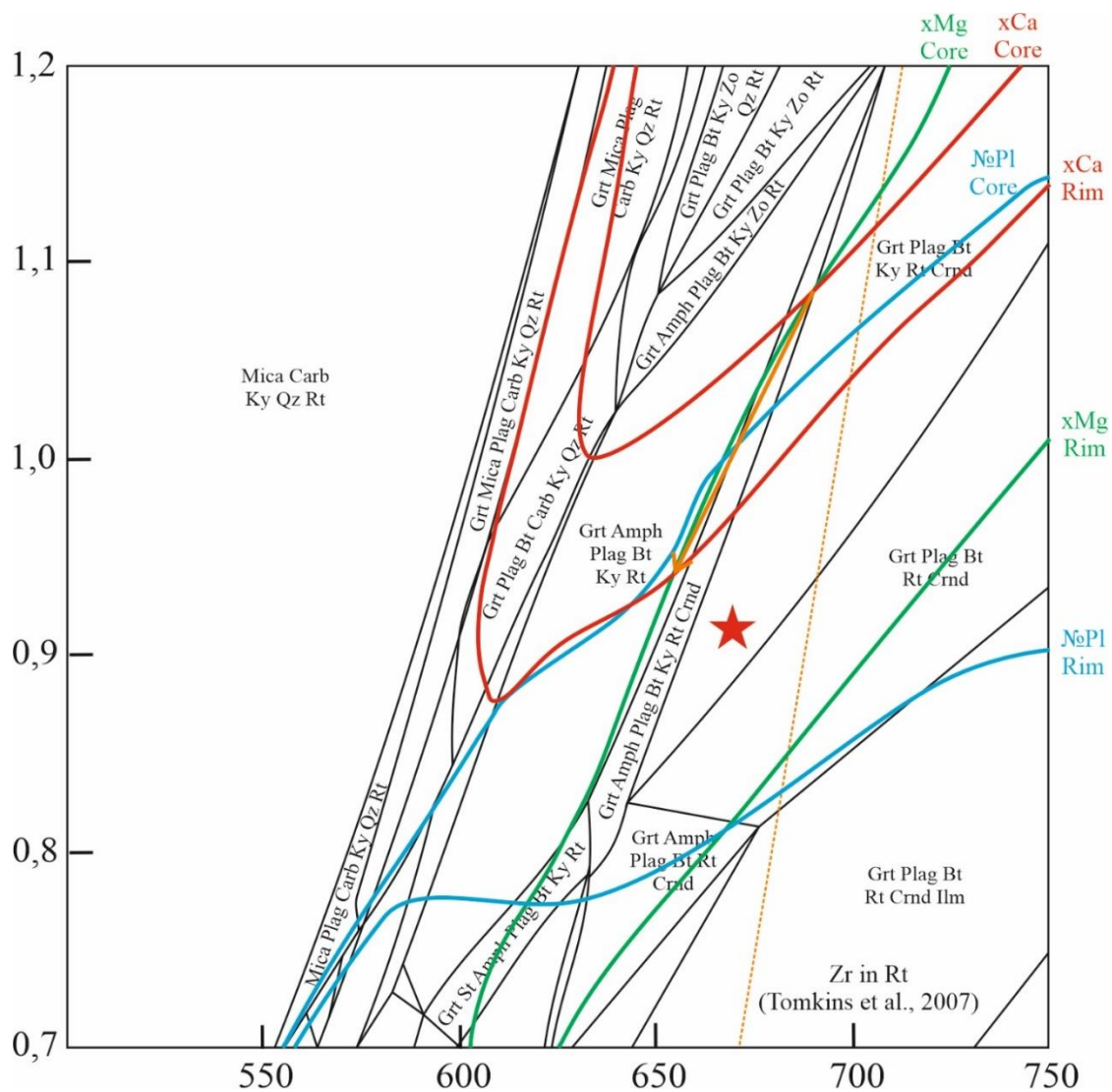


Рис. 22. Увеличенная диаграмма фазовых равновесий с изоплетами составов граната и плаггиоклаза для образца Nur-11.

(По оси y – давление в GPa, а по оси x – температура в °C)

(Подписаны только поля, выраженные в масштабе)

Красной звездой отмечено поле наблюдаемой ассоциации породы

Красные линии – изоплеты xCa для краевых (xCa Rim) и центральных частей (xCa Core) граната, наблюдаемого в породе.

Зелёная линия – изоплета xMg для краевых (xMg Rim) и центральных (xMg core) частей граната, наблюдаемого в породе.

Голубые линии – изоплеты №Pl для краевых (№Pl Rim) и центральных (№Pl Core) частей плаггиоклаза, наблюдаемого в породе.

Оранжевая пунктирная линия – зависимость содержания Zr в рутиле от температуры и давления (Tomkins et al., 2007)

Оранжевая стрелка – предполагаемая PT-история граната.

Расшифровка фаз: (Mica – мусковит, Carb - карбонат, Amph – амфибол, Bt – биотит, Melt – расплав, Plag – плаггиоклаз, Srx – клинопироксен, Орх – ортопироксен, Grt – гранат, Qz – кварц, Ol – оливин, Rt – рутил, Ilm – ильменит, Crnd – корунд, Ky – кианит, Zo – цоезит, St - ставролит)

По построениям (Рис.21, 22) можно сделать вывод, что гранат в породе сохранил данные о декомпрессии с 1,09 до 0,95 GPa при 675-650 C с началом образования амфибола и разложения корунда. Ядра зёрен плаггиоклаза сохранили

память об этом процессе, когда как его каймы не находятся в равновесии с гранатом. Свидетельством этого процесса является то, что краевые части граната содержат включения полигонального корунда, когда как в основной массе породы корунд образует неправильные агрегаты (Рис.23). Отсутствие амфибола в породе, вероятно, связано либо с небольшим размером ксенолита, либо со сложностью его выявления среди псевдоморфоз по биотиту. В любом случае, количество обнаруженного амфибола не превышало бы первые проценты и не влияло на состав всей породы. Оценки термометра для рутила ложатся в пределах погрешности на предложенный РТ-путь.

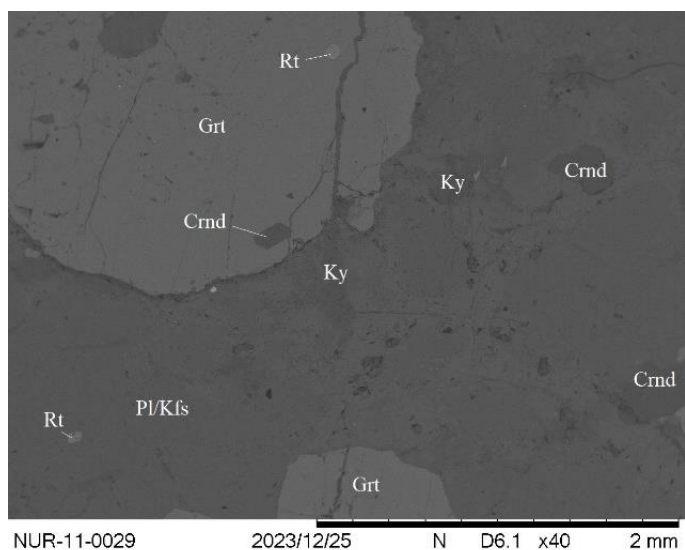


Рис. 23. BSE фотография шлифа Nur-11.

Grt – гранат, Pl – плагиоклаз, Rt – рутил, /Kfs – замещения калиевым шпатом, Ky – кyanит, Crnd – корунд



## Оценка глубины образования

По полученным значениям температур и давлений можно оценить глубину формирования пород ксенолитов по закону архимеда:

$$H = \frac{P}{\rho \cdot g}$$

Где:  $H$  – глубина,  $P$  – давление,  $\rho$  – плотность вышележащих пород,  $g$  – ускорение свободного падения, равное  $9,8 \text{ м/с}^2$

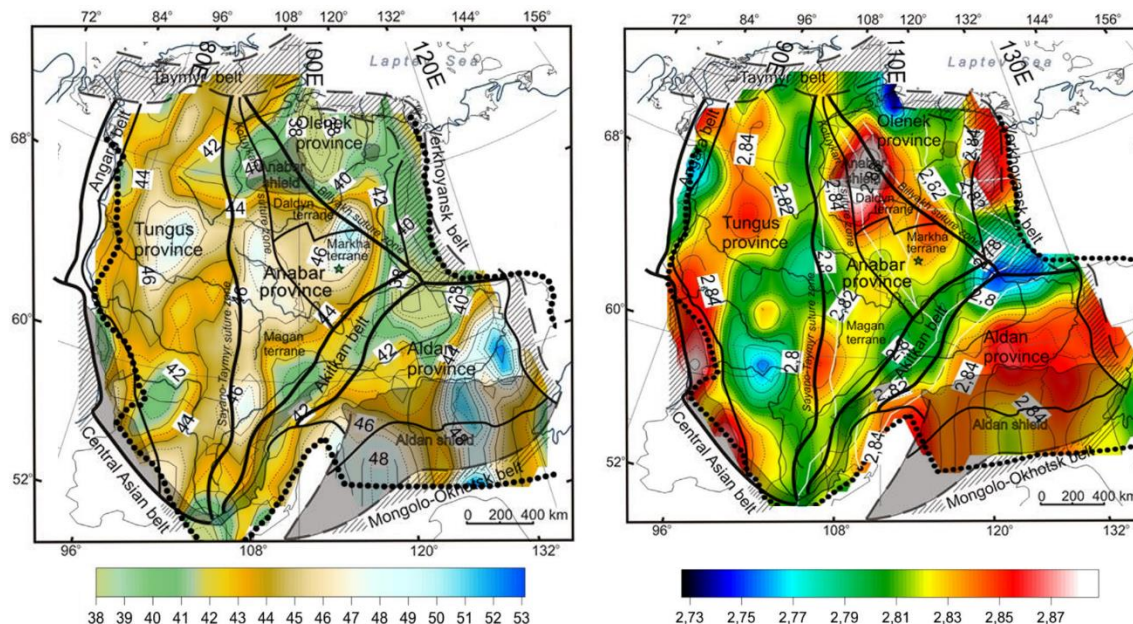


Рис. 24. Глубина современного положения границы МОХО и средняя плотность коры по геофизическим данным

(Cherepanova et al., 2013) (Cherepanova & Artemieva, 2015)

Значение плотности пород кратона в районе рассматриваемых кимберлитовых полей -  $2,84 \text{ т/м}^3$  (Cherepanova & Artemieva, 2015). В результате расчётов, глубина образования гранулитов составляет 30-36 км.

По геофизическим данным из статьи Черепановой с соавторами (2013), мощность Земной коры составляет: 2 км – осадки, 10 км - верхняя кора, 20 км – средняя кора и 16 км – нижняя кора. Граница мохо на территории находится на глубине 48 км (Cherepanova & Artemieva, 2015). Следовательно, рассчитанные глубины образования гранулитов в целом отвечают верхним горизонтам нижней коры Сибирского кратона.

## Интерпретация РТ пути и возраста ксенолитов по литературными данным

Для образцов ксенолитов из трубки Нюрбинская есть опубликованные датировки для циркона, титанита и рутила (минералы с разными температурами закрытия) для фельзических и мафических гранулитов:

- 1) Наиболее древние магматические ядра циркона из мафических гранулитов, датированные В.С. Шатским с соавторами, дают возраста порядка 2,6 млрд лет. (*Shatsky et al., 2022*)
- 2) Датировки метаморфогенного циркона для мафических ксенолитов трубки Нюрбинская по данным М.Ю. Корешковой с соавторами составляет порядка 1,89 млрд лет (*Корешкова и др., 2022*)
- 3) Возраст титанита из образца Nur-1 составляет порядка 1,79 млрд лет (*Корешкова и др., 2022*)
- 4) Есть данные по датированию рутила из нескольких образцов, включая Nur-1, методом ID-TIMS, которые составляют  $1481 \pm 27$  млн лет (*Корешкова и др., 2022*). Температура закрытия у рутила достаточно низкая, так что эту датировку можно принять за возраст остывания пород до  $400^{\circ}\text{C}$
- 5) В статье Апина с соавторами также приводятся данные о датировании рутила из фельзических ксенолитов возрастом 1,6 млрд лет (*Apen et al., 2022*)

Если разместить эти данные на одном графике, то можно предположить общий РТ путь нижнекоровых пород региона:

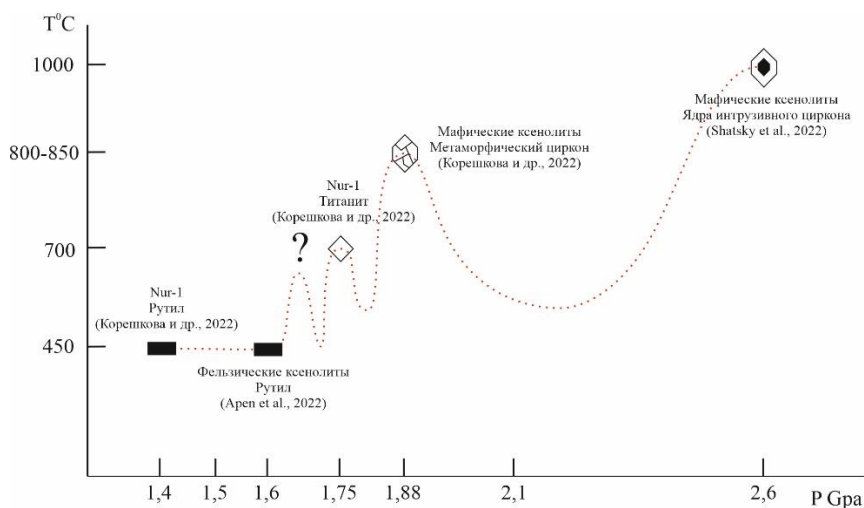


Рис. 25. Предполагаемый РТ-путь нижней коры региона по литературным данным (красный пунктир). Знаком вопроса отмечено предполагаемое температурное событие

При учёте возраста титанита и рутила в образце Nur-1, а также возраста рутила в фельзитическом ксенолите из статьи Апина (*Apen et al., 2022*), возрастной промежуток между закрытием U-Pb системы в титаните и рутиле, составляет порядка 200-250 млн лет. Стабильное остывание с 700 до 450 градусов за такой длительный промежуток маловероятно. Значит, можно предположить некое температурное событие (до 650<sup>0</sup>C), которое нарушило U-Pb систему в рутиле, но не затронуло титанит.

Также, можно предположить, что гранулитовые ассоциации нижней коры образовались не позднее 1,79 млрд лет назад.

## Выводы

Ксенолиты (Nur-1, Nur-11, Nur-35), вынесенные трубкой Нюрбинская, представляют верхние горизонты нижней коры Сибирского кратона. Реконструкция их первичного состава позволила более точно проинтерпретировать протолит. Так, их протолитами являлись лейко-габбронориты для Nur-1/Nur-11 и кварцевый диорит для Nur-35. Для образца Nur-11 также предполагается реститовая природа протолита.

Протолит породы ксенолита Nur-35 был преобразован в условиях гранулитового метаморфизма и находился длительное время при стабильных условиях: 0,83 GPa и 660 °C, в следствие чего, наблюдаемая минеральная ассоциация в нём является равновесной. Текстурные особенности породы, выраженные полосчатостью, вероятно, являются наложенными и обусловлены пластическим течением.

Протолит породы ксенолита Nur-1 испытал метаморфизм в условиях гранулитовой фации с пиковыми условиями при 1,33 GPa 850-880 °C, которые сохранили гранат и включения в нём рутила. Затем при декомпрессии и остывании до 720 °C и 1 GPa образовалась настоящая минеральная ассоциация породы, включая рутил основной массы. Титанит в породе неравновесен с остальной ассоциацией и фиксирует наложенный процесс.

Протолит породы ксенолита Nur-11 испытал декомпрессию с 1,09 до 0,95 GPa при 670 °C, что отражено зональностью граната и плагиоклаза. Ядра зёрен плагиоклаза сохранили память об этом процессе, когда как его каймы не находятся в равновесии с гранатом. В следствие этого процесса, шёл процесс разложения корунда с образованием биотита и амфибола. Это подтверждается тем, что краевые части граната содержат включения полигонального корунда, когда как в основной массе породы корунд образует неправильные агрегаты. Отсутствие амфибола в породе, вероятно, связано либо с небольшим размером ксенолита, либо со сложностью его выявления среди псевдоморфоз по биотиту.

Сравнение датировок рутила и титанита из образца Nur-1 с другими данными о датировании других минералов геохронометров из трубки Нюрбинская позволяет предположить некое температурное событие, затронувшее породы нижней коры региона на промежутке 1,6-1,79 млрд лет. При этом гранулитовые ассоциации нижней коры региона образовались не позднее 1,79 млрд лет назад.



## Благодарности

В первую очередь, выражаю искренние благодарности моему научному руководителю М.Ю. Корешковой за трёхгодичное наставничество, терпение и умение прививать интерес к размышлениям над масштабными идеями, основываясь на тщательном изучении небольших объёмов вещества.

Хочу сказать спасибо Е.Ю. Акимовой, за построение диаграмм фазовых равновесий в `Perple_X`.

Также благодарю сотрудников кафедры петрографии СПбГУ: Ш.К. Балтыбаева, П.Я. Азимова, А.И. Брусницына, О.Ю. Лебедеву и уже упомянутых, за преподавание петрологических наук и возможность слушать лекции от специалистов мирового уровня.

Спасибо всем преподавателям геологического факультета СПбГУ в целом, и сотрудникам кафедр минералогии и геохимии в частности, за доступное объяснение фундаментальной природы химических взаимодействий вещества в течение длинного курса узконаправленных практик и лекций.

Спасибо сотрудникам музеев петрографии и минералогии СПбГУ за поддержку и возможность участия в истории университета, а сотрудникам ресурсных центров СПбГУ за помощь в работе с аналитическими приборами.

## Список литературы

Agashev, A. M., Nakai, S., Serov, I. V., Tolstov, A. V., Garanin, K. V., & Kovalchuk, O. E. (2018). Geochemistry and origin of the Mirny field kimberlites, Siberia. *Mineralogy and Petrology*, 112

Cherepanova, Y., & Artemieva, I. M. (2015). Density heterogeneity of the cratonic lithosphere: A case study of the Siberian Craton. *Gondwana Research*, 28(4), 1344–1360.

Cherepanova, Y., Artemieva, I., Thybo, H., Chermak, Z. (2013). Crustal structure of the Siberian Craton and the West Siberian basin: an appraisal of existing seismic data. *Tectonophysics* 609, 154–183.

Connolly J.A.D. (2005) Computation of phase equilibria by linear programming: A tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation. *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 236. P. 524–541.

Ferry J.M., Wing B.A., and Harrison T.M. (2003). Prograde destruction and formation of monazite and allanite during contact and regional metamorphism of pelites: Petrology and geochronology. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 145: 228–250.

Georoc.eu: The GEOROC Database (Geochemistry of Rocks of the Oceans and Continents) [Электронный ресурс]. – DIGIS Geoscience Centre Göttingen Geochemistry and Isotope Geology - – Режим доступа : <https://georoc.eu/georoc/>, свободный. – Загл. с экрана.

Griffin W. L., Ryan C. G., Kaminsky F. V., O'Reilly S. Y., Natapov L. M., Win T. T., Kinny P. D., Ilupin I. P. (1999). The Siberian lithosphere traverse: mantle terranes and the assembly of the Siberian Craton. *Tectonophysics*. V. 310, № 1-4. P. 1–35.

Holland, T., Powell, R. (1998) An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology* 16:309-43.

Kinny, P.D., Griffin, B.J., Heaman, L.M., Brakhfogel, F.F., Spetsius, Z.V. (1997). SHRIMP U–Pb ages of perovskite from Yakutian kimberlites. *Russian Geology* 38, 97–105.

Koreshkova, M. Y., Downes, H., Levsky, L. K., & Vladykin, N. V. (2011). Petrology and Geochemistry of Granulite Xenoliths from Udachnaya and Komsomolskaya Kimberlite Pipes, Siberia. *Journal of Petrology*, 52(10), 1857–1885.

Krogh Ravna. (2000). The garnet-clinopyroxene Fe<sup>2+</sup>-Mg geothermometer: an updated calibration. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(2), 211–219.

Newton, R. C. & Perkins, D. (1982). Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblage garnet – plagioclase – orthopyroxene (clinopyroxene) – quartz. *American Mineralogist*, 67, 203–222.

Rosen, O. M., Levsky, L. K., Zhuravlev, D. Z., Rotman, A. Ya., Spetsius, Z. V., Makeev, A. F., Zinchuk, N. N., Manakov, A. V. & Serenko, V. P. (2006). Palaeoproterozoic accretion in the northeast Siberian craton: isotopic dating of the Anabar collision system. *Stratigraphy and Geological Correlation* 14, 581-601.

Shatsky V.S., Ragozin, A.L., Qin Wang, Meiqian Wu. (2022). Evidence of Eoarchean crust beneath the Yakutian kimberlite province in the Siberian craton. *Precambrian Research*, 369, 106-512

Shatsky, V.S., Zedgenizov, D.A., Ragozin, A.L., Mityukhin, S.I., Sobolev, N.V. (2005). Evidences of metasomatic origin of diamonds in eclogite xenoliths from kimberlite pipe Udachnaya (Yakutia). *Doklady Earth Sciences* 402, 587-590.

Spetsius, Z. V., Ivanov, A. S., & Mityukhin, S. I. (2006). Diamondiferous xenoliths and megacrysts from the Nyurbinskaya kimberlite pipe (Nakynsky field, Yakutia). *Doklady Earth Sciences*, 409(1), 779–783.

Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the ocean basins*. Saunders, A.D. and Norry, M.J. (Editors), Geological Society of London, London. 42: 313-345.

Tomkins, H.S., Powell, R., Ellis, D.J. (2007). The pressure dependence of the zirconium-in-rutile thermometer, *J. metamorphic Geol.*, 25, 703–713

Корешкова М.Ю., Даунс Х., Стифеева М.В., Акимова Е.Ю., Пейчева И., Димитрова Д., Мачева Л., Ларионов А.Н. (2022). U-Pb Возраст циркона, рутила и титанита в ксенолитах из трубки нюрбинская, якутия. Тезисы VIII Российской конференции по изотопной геохронологии 7-10.06.22

Л.Н. Шарпёнок, А.Е. Костин, Е.К. Кухаренко (2013). TAS-Диаграмма сумма щелочей – кремнезём для химической классификации и диагностики plutonic пород. *Региональная геология и металлогения*, № 56

Трёгер В.Е., Таблицы для оптического определения породообразующих минералов — Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, Москва, 1958 г., 185 стр.