

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИНСТИТУТ НАУК О ЗЕМЛЕ

Кафедра петрографии

Лисовский Глеб Александрович

Выпускная квалификационная работа

**ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КСЕНОЛИТОВ ИЗ
КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК АЛАКИТ-МАРХИНСКОГО И
ДАЛДЫНСКОГО АЛМАЗОНОСНЫХ ПОЛЕЙ, ЯКУТИЯ**

Основная образовательная программа бакалавриата

СВ.5018.2018 «Геология»

Научный руководитель: к.г.-
м.н. Корешкова М.Ю.

Рецензент: к.г.-м.н.
Брусницына Е.А.

Санкт-Петербург

2022

Содержание

Содержание	1
Введение	2
Актуальность работы	2
Район исследования	4
Петрографическое описание шлифов	5
Образец UD-93-180	6
Образец KS-86-31	10
Валовые составы пород	14
Зональность в гранате	16
Термобарометрия	21
Построение диаграмм фазовых равновесий	23
Оценка глубины образования	26
Выводы	27
Благодарности	28
Литература	29

Введение

Кимберлиты представляют собой редкие, небольшие по объему магматические породы, образовавшиеся на глубине более 150-200 км (*Giuliani and Pearson, 2019*). В последнее время кимберлиты привлекают много внимания со стороны научного сообщества из-за их ассоциации с алмазами и глубинными ксенолитами.

Кимберлиты содержат ксенолиты разного состава, вынесенные с разной, от мантии до верхних горизонтов коры, зачастую сильно преобразованные ультраосновными расплавами кимберлитов.

Ксенолиты являются важным источником информации о строении недр Земли. Благодаря их исследованию, можно восстановить обстановки их образования и метаморфизма.

Изучение пород фундамента Сибирского кратона осложнено их глубоким залеганием под осадочным чехлом и новые данные о составах нижнекоровых ксенолитов позволяют расширить поле знаний о его термобарической истории;

Актуальность работы

По данным предыдущих исследований нижнюю кору данного региона составляют гранулиты, но в одной из последних работ высказано утверждение, что породы нижней коры образованы в условиях амфиболитовой фации (*Perchuk et al., 2021*). Главная задача данной работы состоит в том, чтобы подтвердить или опровергнуть это исследование.

Цель работы – дать петрографическую характеристику и установить генезис ксенолитов гранулитов из кимберлитовых трубок Удачная и Комсомольская.

Задачи работы:

1. Выполнить петрографическое описание шлифов ксенолитов
2. Исследовать состав минералов и возможную зональность в гранате
3. Оценить температуры и давления образования пород методами термобарометрии

4. Построить диаграммы фазовых равновесий для данных пород в программе Perple_X
5. Сравнить результаты расчётов параметров образования пород при помощи термобарометрии с результатами построения диаграммы фазовых равновесий.

Использованные методы:

1. Петрографическое описание шлифов;
2. Электронный микронзондовый анализ;
3. Количественный минералогический анализ (при помощи столика Андина)
4. Расчет термобарометрии;
5. Построения диаграмм фазовых равновесий в программе Perple_X

Район исследования

Образцы ксенолитов, исследуемые в данной работе, отобраны из кимберлитовых трубок Удачная и Комсомольская, принадлежащих Адакит-Мархинскому и Далдынскому алмазоносным полям соответственно. Кимберлитовые трубки взрыва Алакит-Мархинского и Далдынского полей Восточно-Сибирской платформы приурочены к магматическому событию конца девона, возраст кимберлитов составляет 365 млн. лет (*Kinny et al., 1997*). Трубки представляют собой округло-эллипсоидные в поперечнике, иногда азимутально-вытянутые, тела щёлочно-ультрабазитового (кимберлитового) состава с резким контактом с вмещающей толщей известняков, доломитов, мергелей и песчаников девонского и ордовикского возраста (*Kharkiv et al., 1991*). Тектоническое расчленение террейнов взято из работы (*Rosen et al., 2006*).

Этот участок сибирского кратона тектонически стабилен долгое время и возраст гранулитового метаморфизма нижнекоровых пород предположительно отвечает коллизионным событиям, связанных с аккрецией Колумбии в позднем палеопротерозое (*Zhao et al., 2011*).

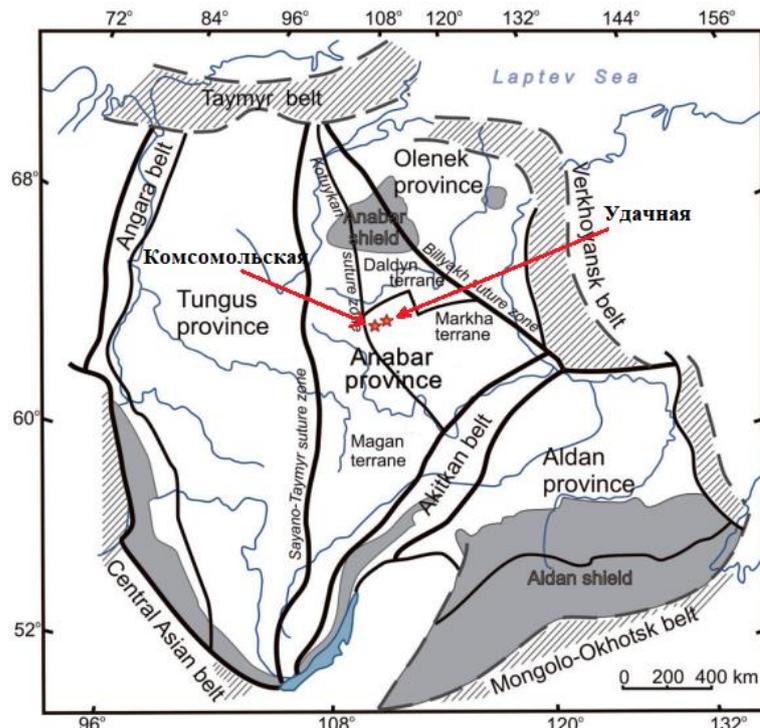


Рис. 1. Схематическая карта Сибирского кратона с обозначением границ террейнов кратона. На карте обозначены кимберлитовые трубки Комсомольская и Удачная, в границах Алакит-Мархинского алмазоносного поля Далдынского террейна и Далдынского алмазоносного поля Мархинского террейна соответственно. (*Rosen et al., 2006*)

Петрографическое описание шлифов

Материал для работы, предоставленный Н.С. Прияткиной составлял 28 шлифов ксенолитов из пяти кимберлитовых трубок трёх алмазоносных полей. При их изучении на петрографическом микроскопе были отобраны два шлифа наименее изменённых пород гранулитов гранат-клинопироксен-плагиоклазового состава, т.к. подобные породы рассматриваются в публикациях по региону, как наиболее глубинные. Образцы UD-93-180 из трубки Удачная и KS-86-31 из трубки Комсомольская были выбраны для детального анализа. При изучении остальных шлифов были встречены трахиты, метапелиты содержащие биотит, альбит, кианит и монацит, а также породы, сильно преобразованные кимберлитовым расплавом и почти полностью замещённые серпентин-хлоритовым агрегатом.

Для определения состава минералов было использовано электронное зондирование на аппарате HITACHI-5000 в ресурсном центре «Микроскопии и микроанализа» СПбГУ.

Образец UD-93-180

Образец ксенолита из трубки Удачная Далдынского алмазоносного поля Далдынского террейна. Гранат-клинопироксеновый гранулит. Текстура порфиробластическая с гранобластической основной массой.

Породообразующие минералы:

Таблица 1 Площадное соотношение породообразующих минералов.

Na-Al-Диопсид*	44%
Альмандин	27%
Андезин	26%
Ильменит	3%

* Прилагательные натриевый и алюминиевый (Na-Al) даны, т.к. содержания Na и Al в клинопироксене превышают 0,1 формульную единицу.

Второстепенные минералы: энстатит

Акцессорные минералы: циркон, фтор-апатит

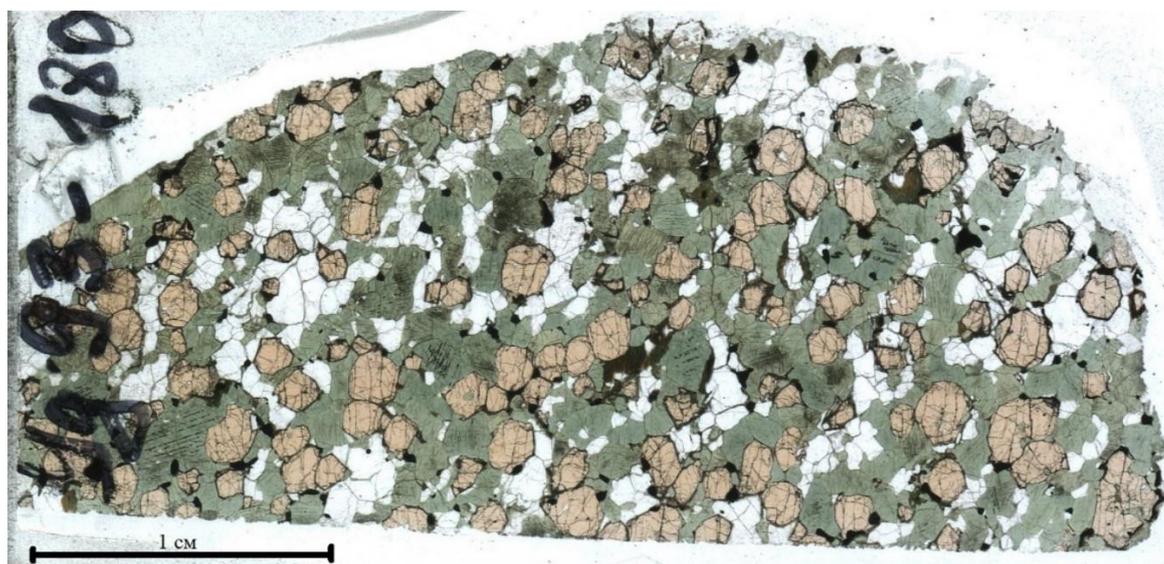


Рис. 2. Фотография шлифа UD-93-180 в проходящем свете. Розовые изометричные зёрна – альмандин, Зелёные ксеноморфные зёрна – диопсид, бесцветные зёрна – андезин. Тёмная рудная фаза – ильменит

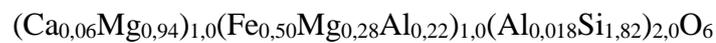
Для определения минеральных видов результаты микрозондового анализа были пересчитаны и вынесены на классификационные диаграммы для

каждого минерала. Анализ зёрен клинопироксена показал, что большинство зёрен относятся к диопсиду, одно зерно попадает в поле авгита. Было проанализировано одно зерно энстатита (Рис. 3).

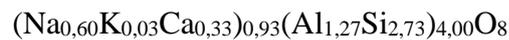
Формула среднего клинопироксена:



Формула ортопироксена:



Формула среднего плагиоклаза:



На треугольной диаграмме миналов граната, все зёрна попадают в поле альмандина (Рис. 4). Средний состав граната – 53% альмандин, 30% пироп, 17% гроссуляр.

Формула среднего состава граната:



*При расчёте формульных единиц граната, здесь и далее, значения Si, полученные при помощи микрозодового анализа, были уменьшены на показатели фона, что не влияет на отношения Mg, Fe, Mn и Ca,

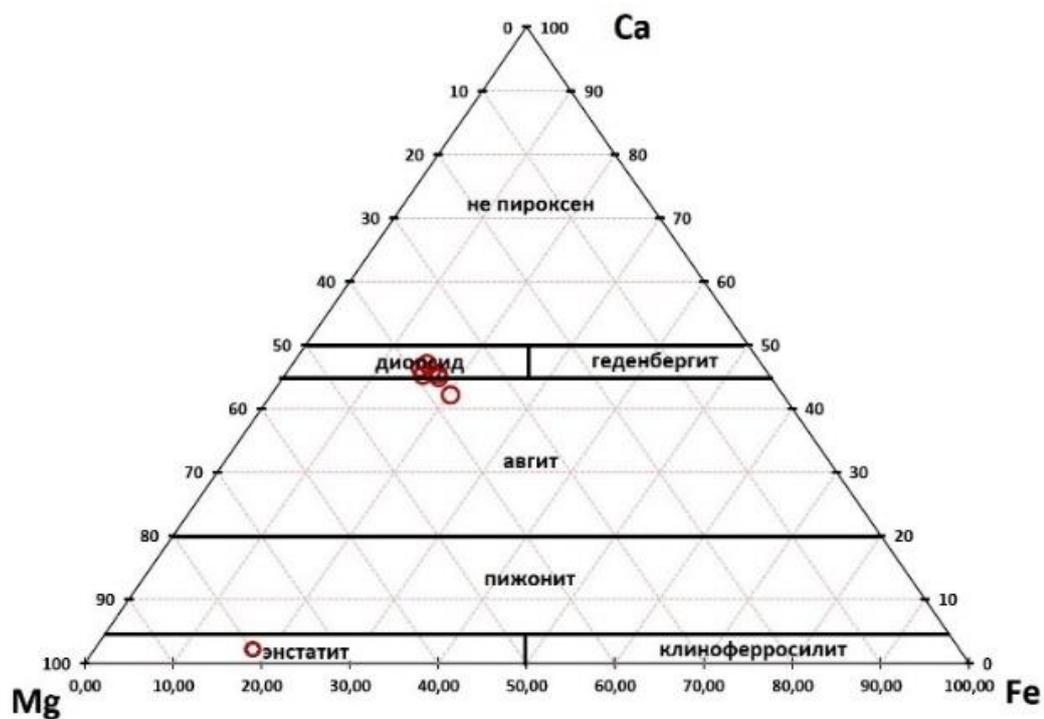


Рис. 3. Классификационная диаграмма составов пироксена

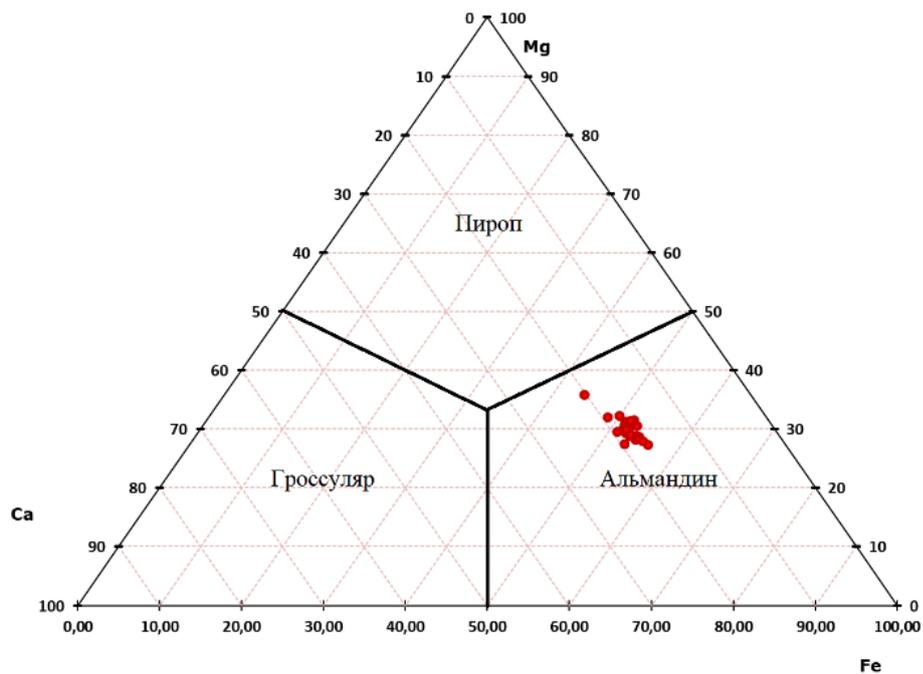


Рис. 4. Классификационная диаграмма составов граната

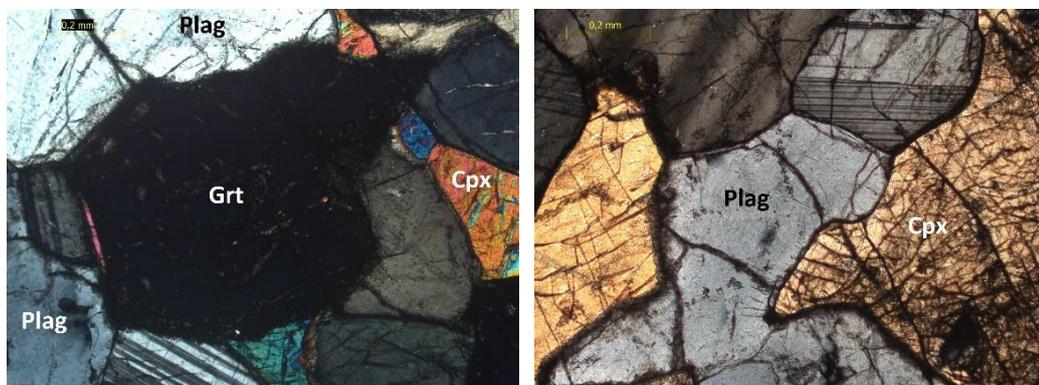


Рис. 5. Фотографии шлифа в проходящем свете при скрещенных николях в поляризационном микроскопе. Grt – гранат, Cpx – клинопироксен, Plag – плагиоклаз.

Таблица 2 Средние составы породообразующих минералов образца UD-93-180 (Масс. %)

	Cpx	Plag	Grt	Ilm
SiO ₂	53,438	61,532	41,581	3,48
TiO ₂	0,107	0,000	0,000	44,54
Al ₂ O ₃	4,536	24,198	20,807	1,19
Fe ₂ O	9,154	0,000	23,211	47,16
MnO	0,000	0,000	0,820	0,00
MgO	11,747	0,000	7,430	2,72
CaO	19,516	6,914	6,150	0,90
Na ₂ O	1,502	6,908	0,000	0,00
K ₂ O	0,000	0,449	0,000	0,00
Сумма	100	100	100	100

Таблица 3 Формульные единицы минералов образца UD-93-180, пересчитанные на кол-во катионов.

	Plag	Cpx	Opx	Grt	Ilm
SiO2	2,73	1,95	1,93	3,01	0
TiO2	0	0,003	0	0	0,89
Al2O3	1,27	0,20	0,24	1,96	0,04
Fe2O	0	0,29	0,5	1,56	1,05
MnO	0	0	0	0,06	0
MgO	0	0,66	1,22	0,89	0,11
CaO	0,33	0,79	0,06	0,53	0
Na2O	0,60	0,11	0	0	0
K2O	0,03	0	0	0	0
Сумма	4,95	4,00	3,95	8,00	2,09

Образец KS-86-31

Образец ксенолита из трубки Комсомольская Алакит-Мархинского алмазоносного поля Мархинского террейна. Гранат-клинопироксеновый гранулит. Текстура порфиробластическая с гранобластической основной массой. В отличие от образца из Удачной, в нём в гораздо большей степени проявлены вторичные изменения, представленные агрегатом серпентина и хлорита, а также присутствуют вторичные каймы кварца по замещённым зёрнам.

Породообразующие минералы:

Таблица 4 Площадное соотношение породообразующих минералов.

Олигоклаз	33%
Альмандин	30%
Na-Al Авгит	29%
Ильменит	5%
Кварц	3%

Вторичные минералы: энстатит

Аксессуарные минералы: циркон, фтор-апатит



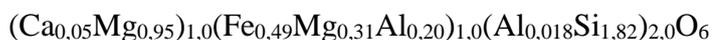
Рис. 6. Фотография шлифа KS-86-31 в проходящем свете. Розовые ксеноморфные зёрна – альмандин, Зелёные ксеноморфные зёрна – авгит, бесцветные зёрна – андезин. Тёмная рудная фаза – ильменит. Тёмно-зелёные агрегаты – замещение породообразующих минералов смесью хлорита и серпентина.

На классификационных диаграммах, составы клинопироксена лежат в поле авгита, кроме двух зёрен, попадающих в поле диопсида (Рис. 7). Так же, как и в образце из Удачной, найдено единичное зерно энстатита, а содержания Na и Al превышают 0,1 формульную единицу.

Формула среднего клинопироксена:



Формула ортопироксена:



Формула среднего плагиоклаза:



Составы граната попадают в поле альмандина, среднее соотношение миналов – 52% альмандин, 30% пироп, 18% гроссуляр (Рис. 8).

Формула среднего состава граната:

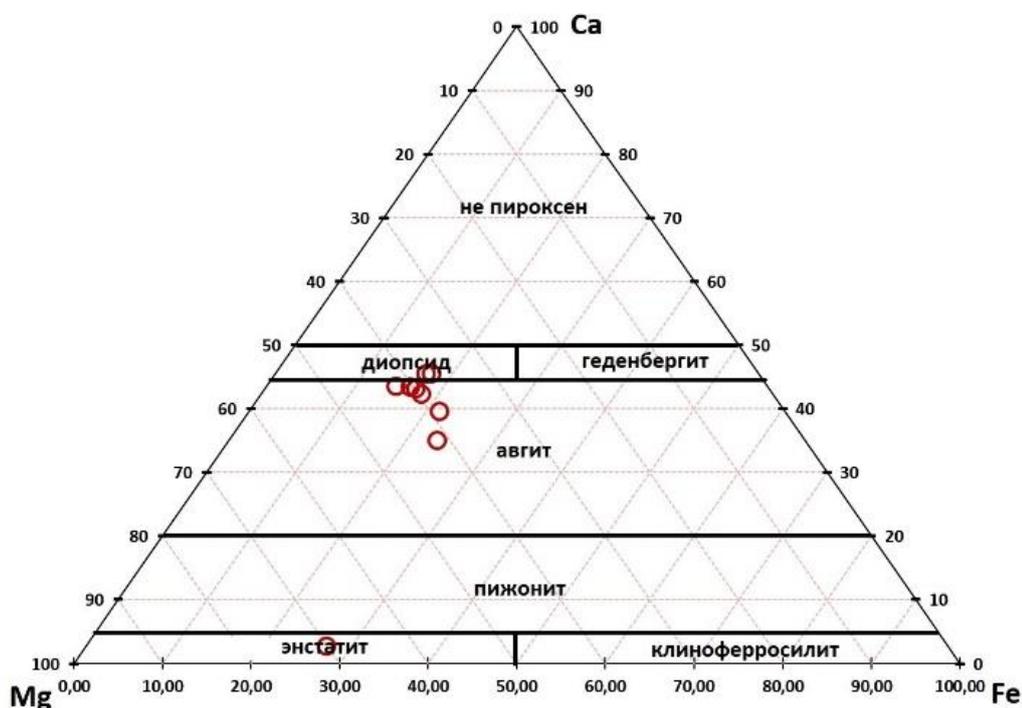


Рис. 7. Классификационная диаграмма составов клинопироксена.

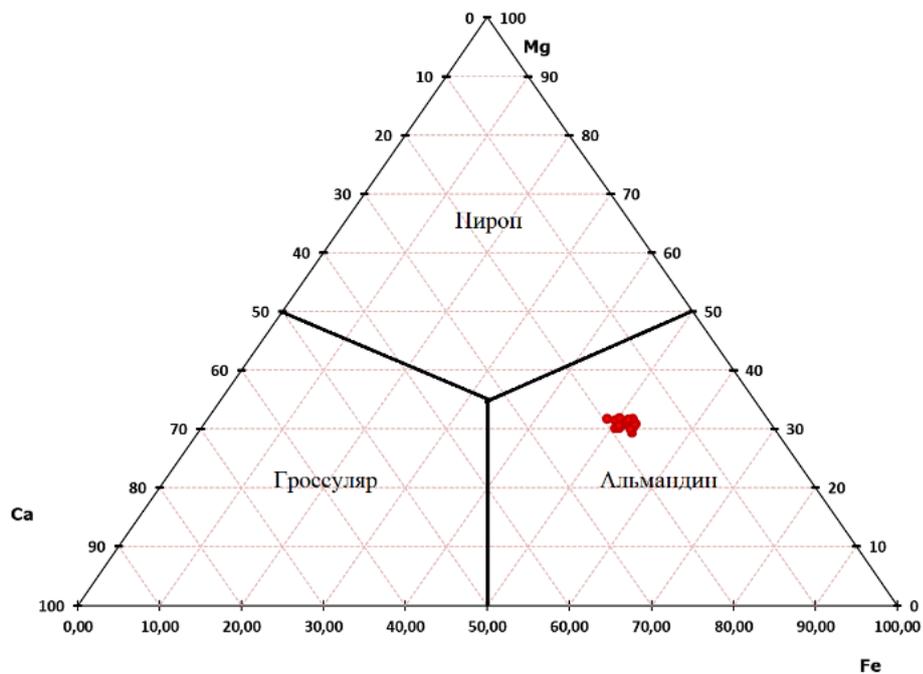


Рис. 8. Классификационная диаграмма составов граната.
(Pyr – пироп, Gross – гроссулярь, Alm - Альмандин)

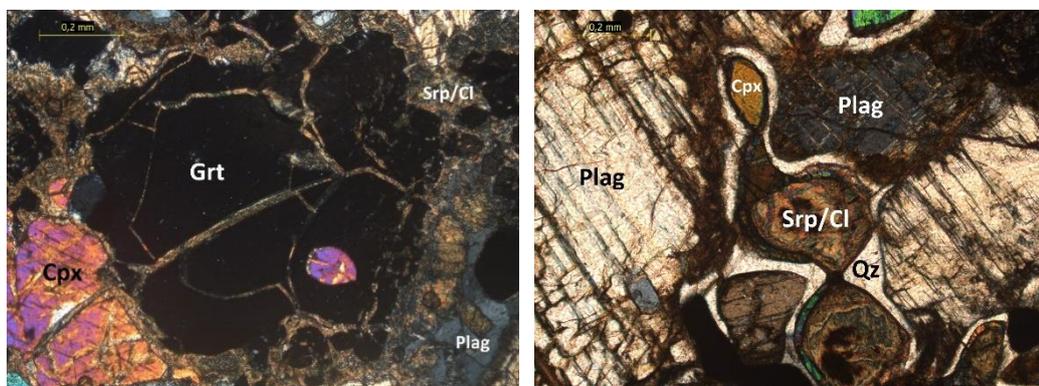


Рис. 9. Фотографии шлифа в проходящем свете при скрещенных николях в поляризационном микроскопе. Grt – гранат, Cpx – клинопироксен, Plag – плагиоклаз, Srp|Cl – серпентин-хлоритовый агрегат.

Таблица 5 Средние составы породообразующих минералов образца KS-86-31 в масс. %

	Cpx	Plag	Grt	Ilm
SiO ₂	53,55	61,77	41,62	5,19
TiO ₂	0	0	0,00	43,60
Al ₂ O ₃	4,87	23,31	20,61	2,50
FeO	9,90	0,73	23,18	45,42
MnO	0	0	0,89	0
MgO	12,13	0,28	7,68	3,30
CaO	18,04	5,87	6,03	0
Na ₂ O	1,53	7,34	0,00	0
K ₂ O	0	1	0,00	0
Сумма	100	100	100	100

Таблица 6 Формульные единицы минералов образца KS-86-31, пересчитанные на кол-во катионов.

	Plag	Cpx	Opx	Grt	Ilm
SiO ₂	2,75	1,93	1,82	3,00	0
TiO ₂	0	0	0	0	0,87
Al ₂ O ₃	1,22	0,21	0,33	1,98	0,08
Fe ₂ O	0,03	0,30	0,49	1,55	1,01
MnO	0	0	0	0,05	0,13
MgO	0,02	0,73	1,26	0,91	0
CaO	0,28	0,71	0,05	0,51	0
Na ₂ O	0,63	0,12	0	0	0
K ₂ O	0,04	0	0	0	0
Сумма	4,97	4,00	3,95	8,00	2,09

Валовые составы пород

Для обоих шлифов был рассчитан валовый состав по площадному соотношению породообразующих минералов и табличным данным для плотностей минеральных видов по (Трёгер, 1958). Значения плотностей выбирались с помощью диаграмм составов, чтобы максимально соответствовать средним составам минералов образцов.

Таблица 7 Рассчитанные валовые составы пород (в масс. %)

	UD-93-180	KS-86-31
SiO ₂	49,07	49,01
TiO ₂	1,84	2,93
Al ₂ O ₃	14,03	15,33
FeO	13,67	14,67
MnO	0,09	0,20
MgO	7,52	6,51
CaO	11,65	8,84
Na ₂ O	2,04	2,32
K ₂ O	0,09	0,18
Сумма	100	100

По этим данным состав пород был вынесен на диаграмму *Дженсена* (Jensen, 1976), где попадает в поле коматиитовых базальтов (Рис. 10). Также на диаграмму были вынесены результаты анализов валовых составов ксенолитов, из трубок Удачная и Комсомольская, представленные в статье (Korshkova et al., 2011). В результате, данные из статьи попали в то же поле, что и рассчитанные в настоящей работе. Важно отметить, что столик Андина позволяет исключить из расчёта валового состава породы вторичные изменения в ксенолите, поэтому полученные с его помощью данные более корректно отражают первичный состав породы. Вторичные изменения ксенолитов из кимберлитов в основном представлены замещением минералов агрегатом хлорита и серпентина, и при анализе порошковых проб аллохимическое замещение вторичными минералами

может сказаться на магнезиальности валового состава. Например, указанной статье, один из изменённых образцов попадает в поле коматиитов.

Нельзя исключить возможность того, что протолиты являются не вулканитами, а высокожелезистыми габброидами. Для обоснования природы протолита нужны дополнительные исследования.

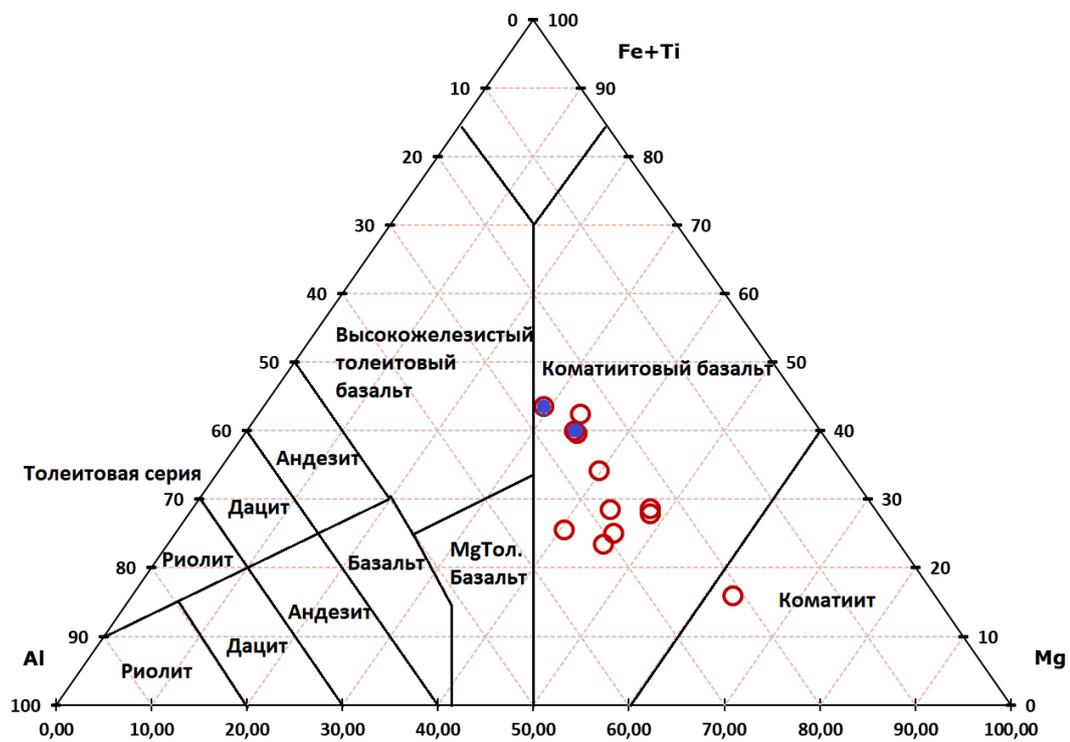


Рис. 10. Диаграмма Дженсена (Jensen, 1976) с составами образцов ксенолитов.

Синие точки – рассчитанные составы пород для двух ксенолитов

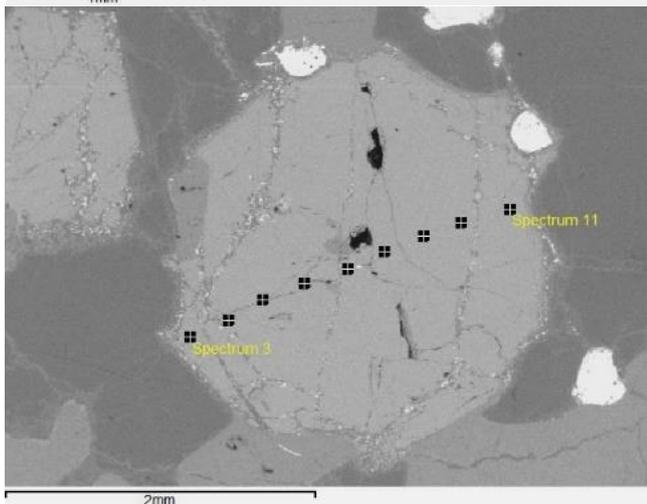
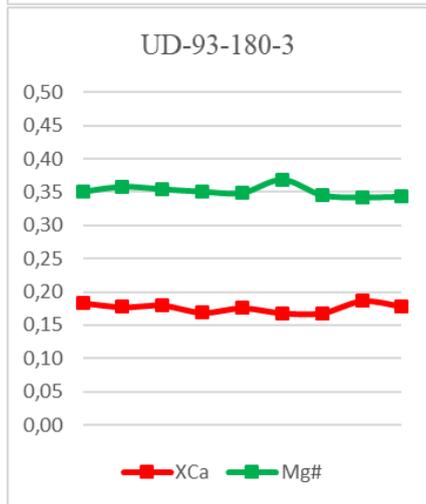
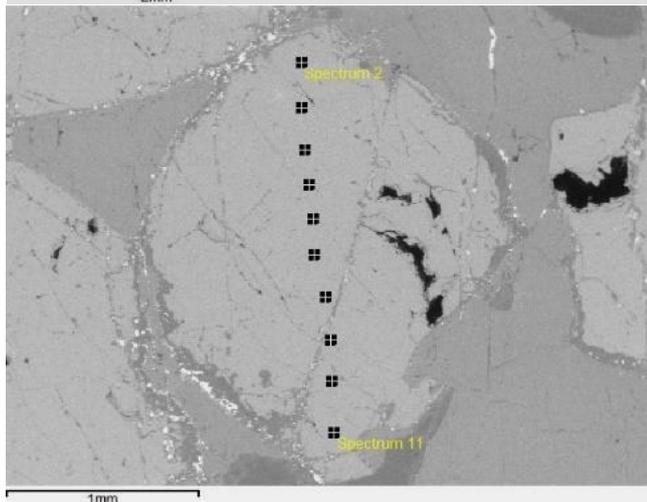
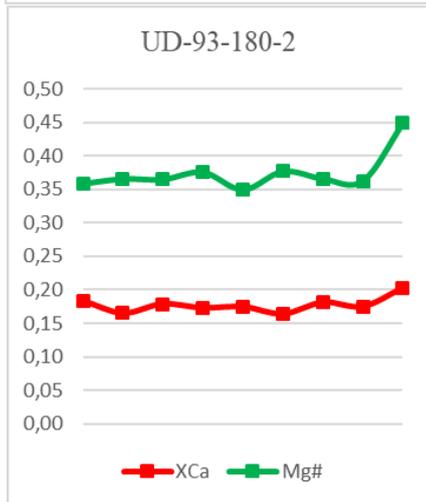
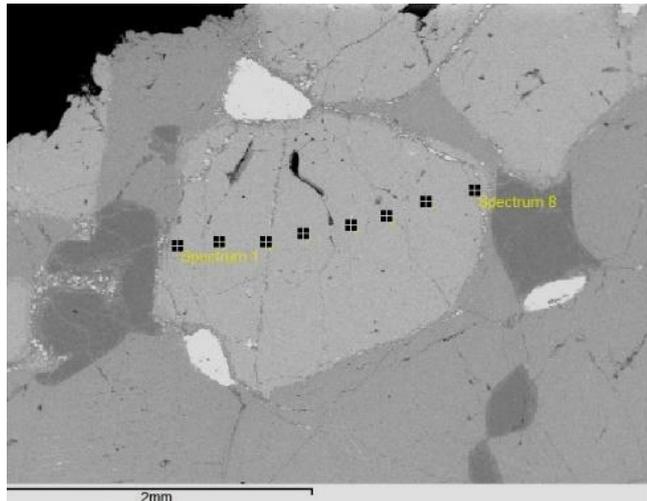
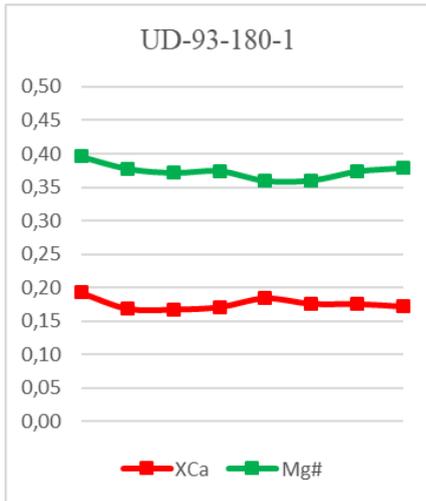
Красные – данные из статьи (Koreshkova et al., 2011)

Зональность в гранате

Для граната нижнекоровых гранулитов нередко характерна зональность содержания Fe, Mg и Ca. Она связана с диффузией при росте зёрен и последующего изменения температуры. Для рассматриваемых образцов были проанализированы содержания в пяти зёрнах граната при помощи микрозондового анализа. Для этого с равным шагом от края к краю зерна делалась цепочка анализов, затем были рассчитаны отношения элементов в формульных единицах: $x_{Ca} = Ca/(Ca+Mg+Fe+Mn)$ и $Mg\# = Mg/(Mg+Fe)$, т.к. эти показатели традиционно используются для выявления зональности в гранатах. После чего, были построены и наложены друг на друга графики этих отношений (Рис. 11, Рис. 12).

Результаты анализа зёрен граната образца UD-93-180 и KS-86-31 представлены на рисунках 8 и 9. Отклонения значений от ядер к каймам не выражена. На это может быть четыре причины:

1. Зональность в гранате отсутствует и минералы в породе являются равновесными, что маловероятно, учитывая, скорости остывания глубинных пород
2. Разницы содержаний Fe, Mg и Ca от ядра к краю настолько малы, что для её регистрации не хватает разрешающей способности прибора. Зёрна граната достаточно крупные (до 2мм) и зоны, анализируемые электронным пучком микрозонда, не накладывались друг на друга.
3. Ширина кайм с отличным составом, характерных для диффузионной зональности при остывании породы после пиковых условий метаморфизма, слишком мала и может быть установлена только при более частом ходе точек анализов.
4. Это может быть связано с вторичными изменениями под влиянием кимберлитового состава и образованием келифита – аморфного агрегата, образующемся на границе зёрен граната при резком нагреве в момент захвата ксенолита кимберлитовым расплавом и, в последствии замещённым серпентин-хлоритовым агрегатом.



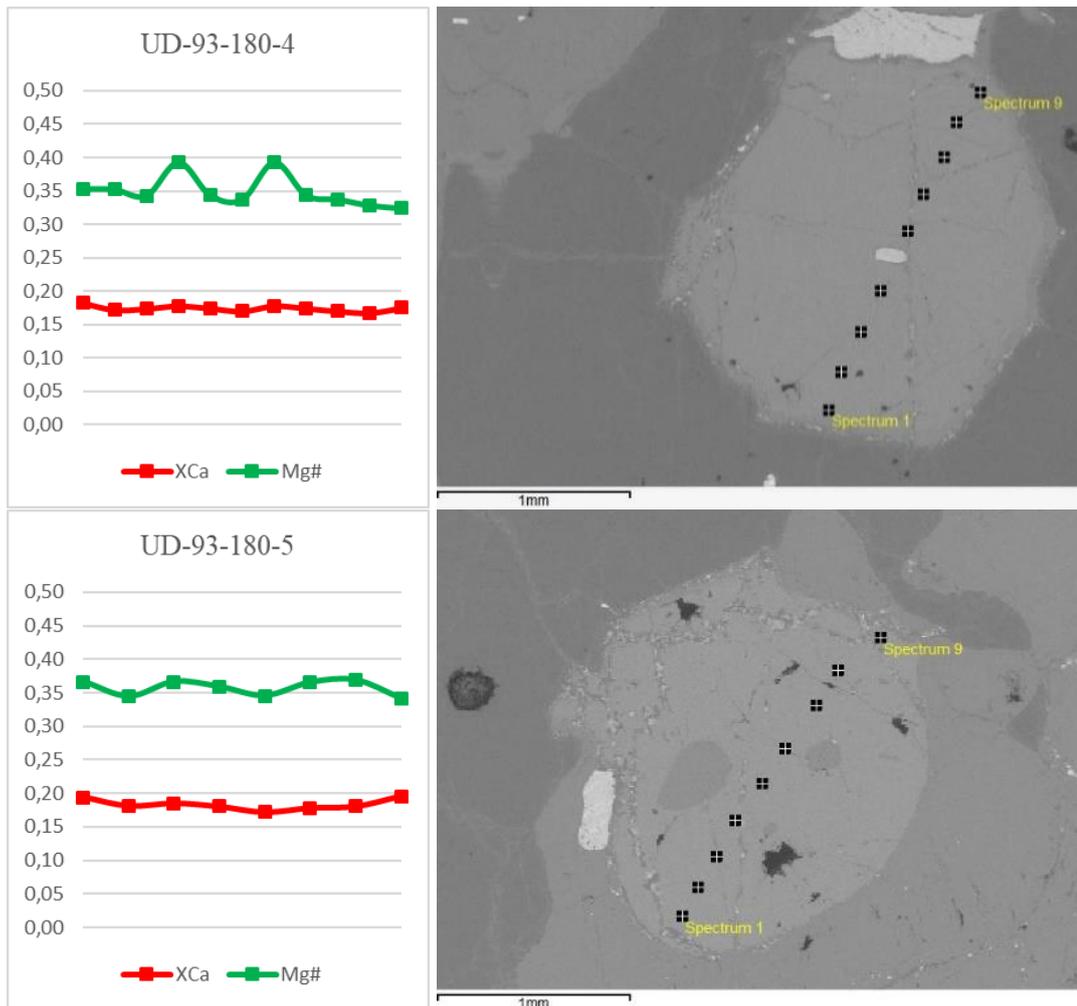
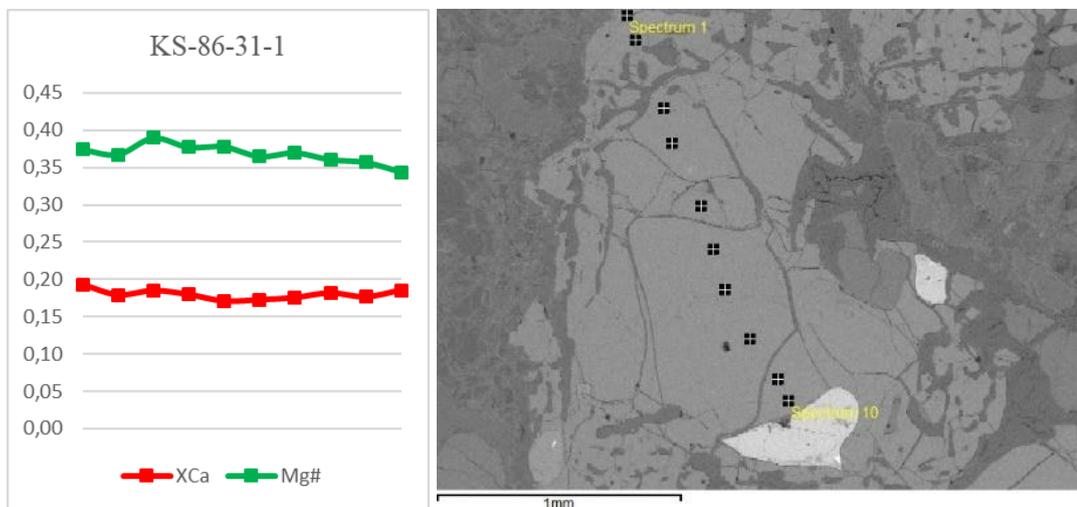
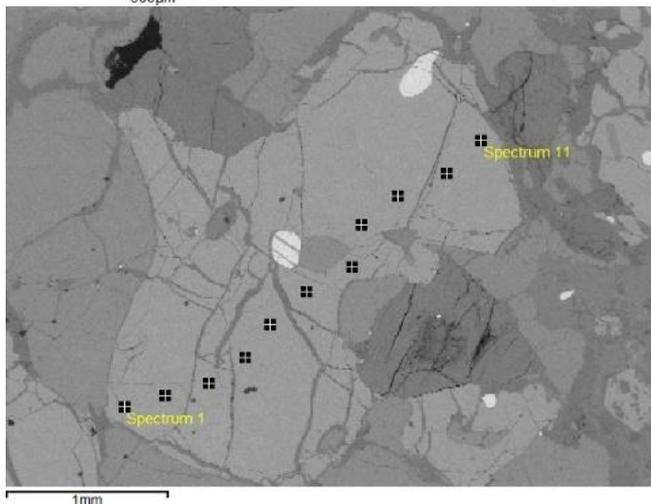
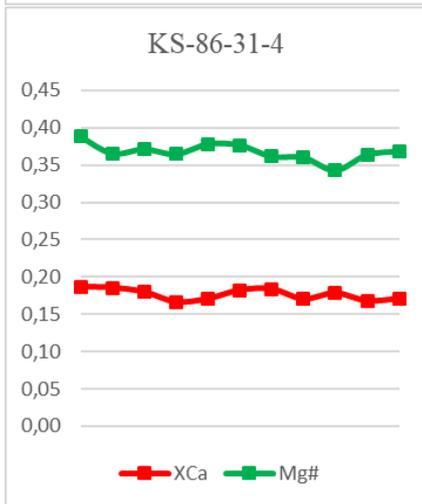
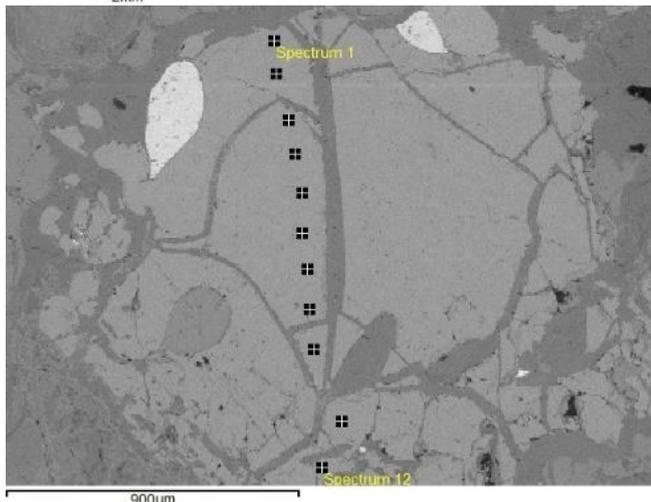
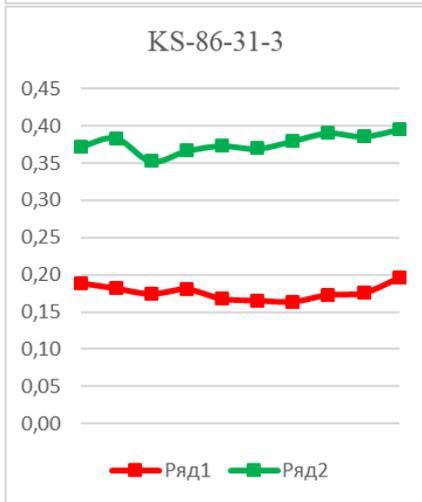
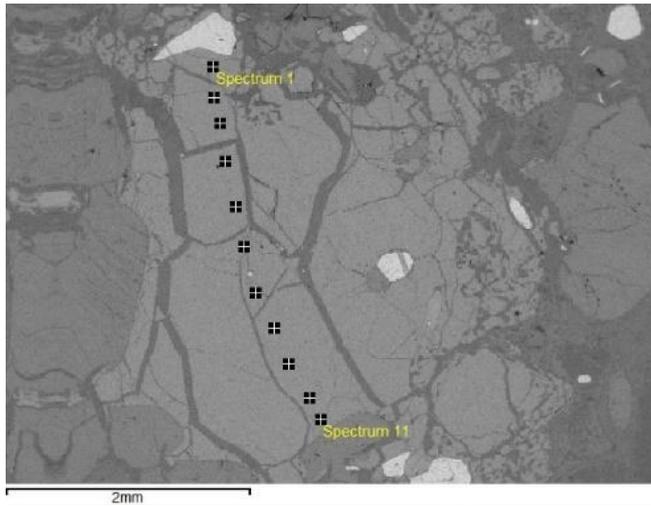
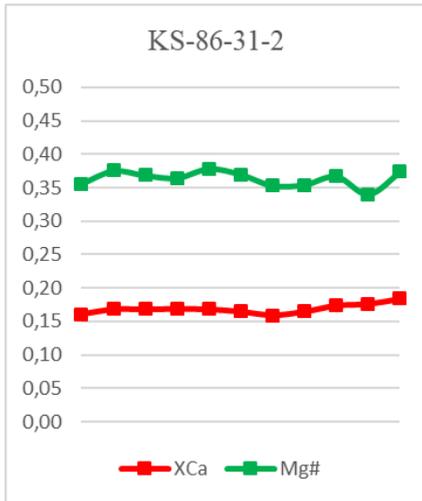


Рис. 11. Анализ зональности зёрен граната в образце UD-93-180. Слева представлены сравнения графиков относительных параметров Mg# и xCa. Справа представлены фотографии зёрен граната, сделанные с помощью электронного микроскопа, с отметками точек, проанализированных методом микрозондирования.





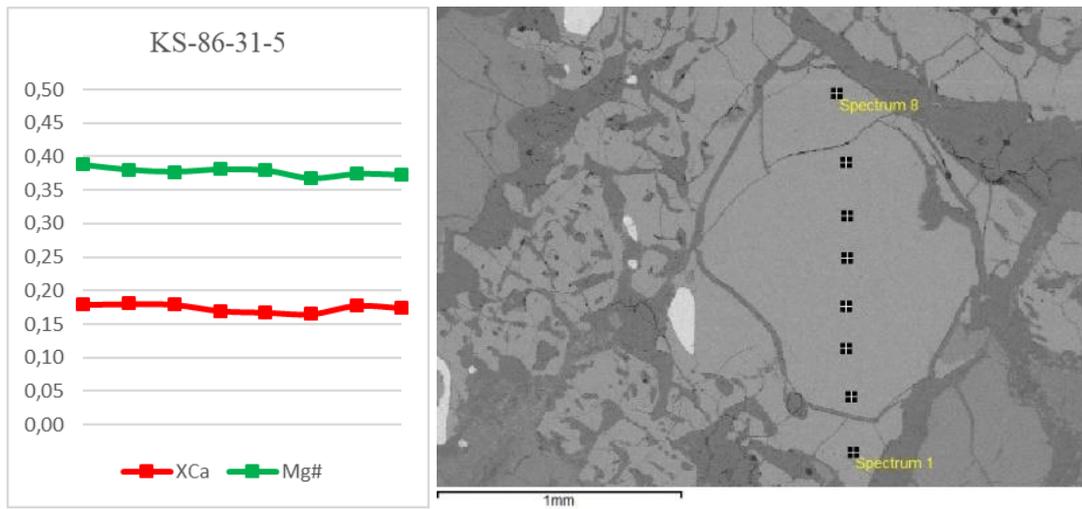


Рис. 6. Анализ зональности зёрен граната в образце KS-86-31. Слева представлены сравнения графиков относительных параметров Mg# и xCa. Справа представлены фотографии зёрен граната, сделанные с помощью электронного микроскопа, с отметками точек, проанализированных методом микрозондирования.

Термобарометрия

Для обоих образцов был проведён расчёт температуры и давления образования методами термобарометрии по уравнениям гранат-плагиоклаз-клинопироксенового геобарометра и гранат-клинопироксенового Fe²⁺-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 плагиоклазом с образованием граната и кварца, чувствительной к изменению давления, и обмену железом и магнием между гранатом и клинопироксеном, чувствительном к изменению температуры.

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:

a – содержание элемента в минерале в вес %

Pl - плагиоклаз, 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. Результаты расчётов представлены в таблице 8. Разница при расчётах, учитывающих зональность в гранате, находится в пределах погрешности.

Таблица 8 Результаты расчёта термобарометрии для образцов по результатам микрозондового анализа.

UD-93-180	P(GPa)	T (°C)
Среднее	0,94	777
Ядро зёрен граната	0,91	766
Края зёрен граната	0,95	792
KS-86-31		
Среднее	1,03	806
Ядро зёрен граната	1,05	810
Края зёрен граната	1,00	805

Построение диаграмм фазовых равновесий

Для построения диаграмм фазовых равновесий была использована программа Perple-X, 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 двух образцов, без учёта Mn, т.к. он является изоморфным компонентом и не образует минеральных собственных фаз. Была выбрана база данных (*Holland and Powell, 1998*), из-за её универсальности. Т.к. при петрографическом описании, водных минералов выявлено не было, был выбран расчёт без учёта флюида. Модели твёрдых растворов были выбраны для минералов, наиболее подходящих по генезису породообразующим: граната, кордиерита, ортопироксена, клинопироксена, амфибола, слюды, хлорита, полевых шпатов, кварца, ильменита, рутила и шпинели. Не все из этих минералов попали на диаграмму в выбранном РТ-диапазоне.

В результате были получены фазовые диаграммы для каждого из образцов. После чего, диаграммы были графически отредактированы и были нанесены данные расчётов с использованием минеральных термобарометров с отметками погрешности расчётов:

Для образца из Удачной, рассчитанные давление и температура попадает в поле ассоциации плагиоклаза, клинопироксена, ортопироксена, граната, кварца и ильменита (Рис. 13). Все минералы, кроме кварца, были определены при петрографическом описании шлифа, Отсутствие кварца скорее всего связано с его полным замещением вторичным агрегатом серпентина и хлорита.

Расчёты для образца из Комсомольской (Рис. 14), попадают в поле минеральной ассоциации плагиоклаза, клинопироксена, ортопироксена, граната, кварца, рутила и ильменита. Минеральный состав поля соответствует составу породы, но рутила обнаружено не было. Но в пределах погрешности выбранного

термобарометра располагается поле без рутила, так что фазовая диаграмма и расчёты термобарометрии не противоречат друг другу.

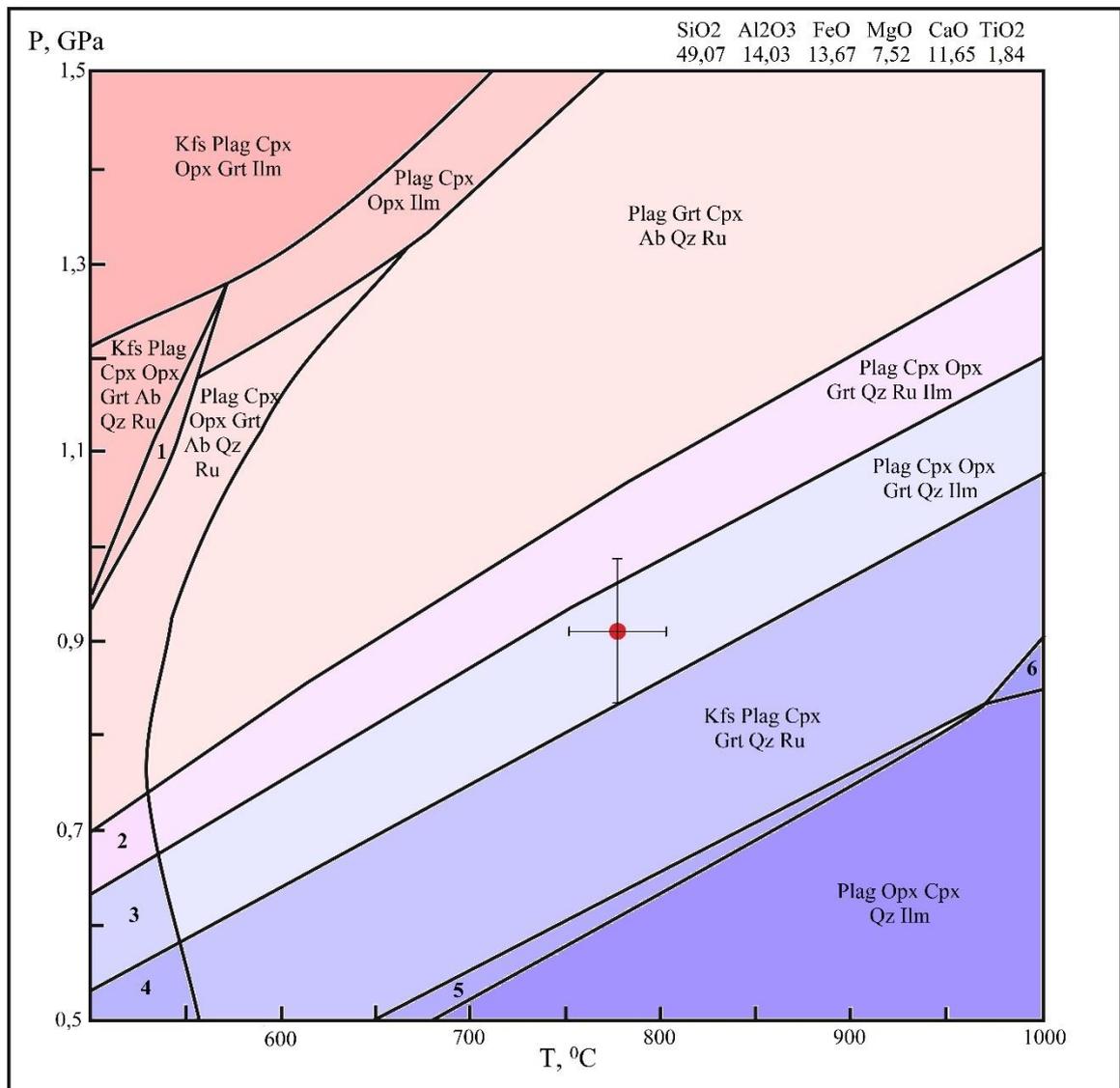


Рис. 7. Диаграмма фазовых равновесий для образца UD-93-180.

Красной точкой отмечены результаты термобарометрии

Минеральные фазы:

- 1 – Kfs Plag Cpx Grt Ab Qz Ru,
- 2 – Kfs Plag Cpx Opx Grt Qz Ru Ilm,
- 3 – Kfs Plag Cpx Opx Grt Qz Ilm,
- 4 – Kfs Plag Cpx Opx Grt Ilm,
- 5 – Plag Cpx Opx Grt O Ilm,
- 6 – Plag Cpx Opx Ilm.

Kfs – Калиевый полевоый шпат, Plag – плагиоклаз, Cpx – клинопироксен, Opx – ортопироксен, Grt – гранат, Qz – кварц, O – кислород, Ru – рути, Ilm – ильменит.

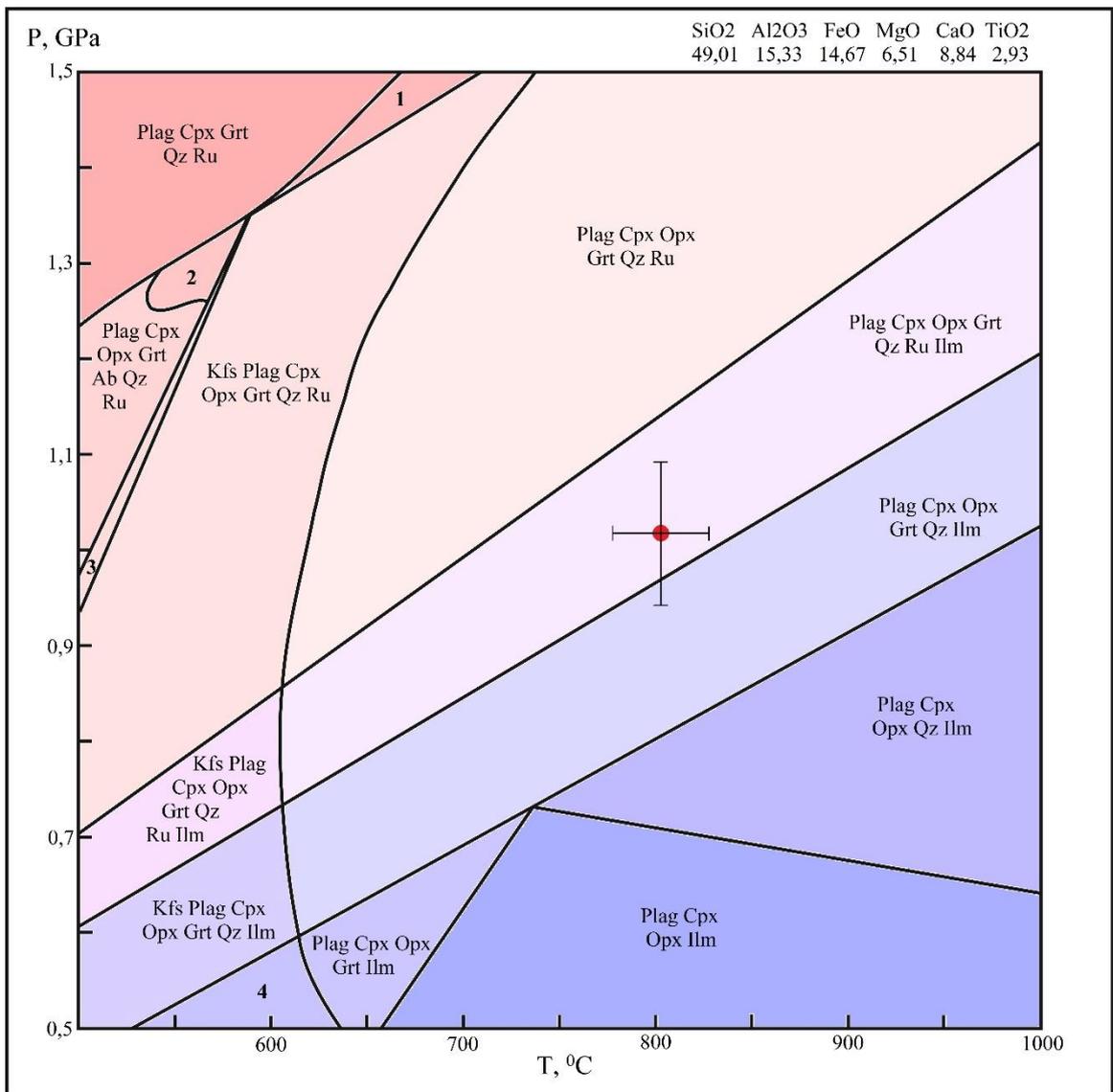


Рис. 8. Диаграмма фазовых равновесий для образца KS-86-31.

Красной точкой отмечены результаты термоброметрических расчётов и поля погрешности.

Минеральные фазы:

1 – Kfs Plag Cpx Grt Qz Ru,

2 - Plag Cpx Grt Ab Qz Ru,

3 – Kfs Plag Cpx Opx Grt Ab Qz Ru,

4 – Kfs Plag Cpx Opx Grt Ilm.

(Kfs – Калиевый полево шпат, Plag – плагиоклаз, Cpx – клинопироксен, Opx – ортопироксен, Grt – гранат, Qz – кварц, Ab – альбит, Ru – рутил, Ilm – ильменит.)

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,

ρ – плотность вышележащих пород,

g – ускорение свободного падения, равное $9,8 \text{ м/с}^2$

Значение плотности пород кратона в районе рассматриваемых кимберлитовых полей - $2,82 \text{ т/м}^3$ (*Cherepanova & Artemieva, 2015*). В результате расчётов, глубина образования гранулитов составляет 37-34 км.

По геофизическим данным из статьи (*Cherepanova et al., 2013*), мощность Земной коры составляет: 2 км – осадки, 10 км - верхняя кора, 20 км – средняя кора и 14 км – нижняя кора. Граница мохо на территории находится на глубине 46 км (*Cherepanova & Artemieva, 2015*). Следовательно, рассчитанные глубины образования гранулитов отвечают нижней коре Сибирского кратона.

Выводы

В работе проведено петрографическое описание шлифов ксенолитов из кимберлитовых трубок Удачная и Комсомольская. Рассчитаны валовые составы площадным методом, определены минеральный состав и структура. Образцы представляют собой клинопироксен-гранатовые гранулиты с рудной фазой, представленной ильменитом, валовые составы отвечают коматиитовым базальтам или высокожелезистым габброидам. Исследование зональности в гранате показало её отсутствие. Методами термобарометрии были оценены температуры и давления формирования гранулитов и установлено, что исследуемые ксенолиты относятся к нижнекоровым. При помощи программы *Perple_X* были построены диаграммы фазовых равновесий для рассчитанных валовых составов пород. Результаты построений совпадают с минеральной ассоциацией пород в рамках погрешности выбранных геотермобарометров.

В результате, предположение, представленное в исследовании (*Perchuk et al., 2021*), что образование нижнекоровых пород региона происходило в условиях амфиболитовой фации метаморфизма, в данной работе не подтвердилось и возможно, амфиболитовая фация в ксенолитах в работе (*Perchuk et al., 2021*) наложена на гранулитовую.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю, доценту кафедры Петрографии, ИНоЗ, СПбГУ, к.г.-м.н., Корешковой М.Ю. за трепетное руководство, прошлому научному руководителю на кафедре региональной геологии, научному сотруднику, ИНоЗ, СПбГУ, к.г.-м.н., Прияткиной Н.С. за наставничество на прошлых курсах университета и предоставление фактического материала для написания работы, ассистенту кафедры Петрографии, ИНоЗ, СПбГУ, Акимовой Е.Ю. за помощь с работой в программе `Perple_X` и лекции по термобарометрии, Балтыбаеву Ш.К., Брусницыну А.И., Путинцевой Е.В за критику и конструктивные замечания по мере написания ВКР, рецензенту, к.г.-м.н., Брусницыной Е.А., а также всем сотрудникам Ресурсного Центра Микроскопии и Микроанализа, СПбГУ и музеям кафедр петрографии и минералогии СПбГУ.

Литература

1. 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.
2. Cherepanova, Y., Artemieva, I., Thybo, H., Chemia, Z., 2013. Crustal structure of the Siberian Craton and the West Siberian basin: an appraisal of existing seismic data. *Tectonophysics* 609, 154–183.
3. Giuliani, A., & Pearson, D. G. (2019). Kimberlites: From Deep Earth to Diamond Mines. *Elements*, 15(6), 377–380.
4. Holland, T., Powell, R. (1998) An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology* 16:309-43.
5. Jensen, L.S., 1976. A new cation plot for classifying subalkalic volcanic rocks. *Ont. Div. Mines, Misc. Paper №66*, 21.
6. Kharkiv, A.D., Zherdev, P. Y., Makhotkin, I. L., Sheremeev, V. F. (1991). Peculiarities of diamond-bearing pipe substance composition, Majhgawan (central India). *Izvestiya - Akademiya Nauk SSSR, Seriya Geologicheskaya*. Part 3, 123-132.
7. 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.
8. 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.
9. Krogh Ravna. (2000). The garnet-clinopyroxene Fe^{2+} -Mg geothermometer: an updated calibration. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(2), 211–219.
10. Newton, R. C. & Perkins, D., 1982. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblage garnet – plagioclase – orthopyroxene (clinopyroxene) – quartz. *American Mineralogist*, 67, 203–222.
11. Perchuk, A. L., Sapegina, A. V., Safonov, O. G., Yapaskurt, V. O., Shatsky, V. S., & Malkovets, V. G. (2021). Reduced amphibolite facies conditions in the Precambrian continental crust of the Siberian craton recorded by mafic granulite

xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia. *Precambrian Research*, 357.

12. 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.
13. Zhao, G., Li, S., Sun, M., & Wilde, S. A. (2011). Assembly, accretion, and break-up of the Palaeo-Mesoproterozoic Columbia supercontinent: record in the North China Craton revisited. *International Geology Review*, 53(11-12), 1331–1356.
14. Трёгер В.Е., Таблицы для оптического определения породобразующих минералов — Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, Москва, 1958 г., 185 стр.